Hall A Proton Parity EXperiment

R. Holmes, W.Kahl*, P. Souder

Syracuse University

D. Armstrong, M. Finn, G. Rutledge*

The College of William and Mary

K. Kumar, W. Miller*

Princeton University

R. Michaels

Hall A, Jefferson Lab

M. Baylac*, E. Burtin, C. Cavata, B. Frois, J. Jardillier*,
D. Lhuillier, F.Marie, D.Neyret, T. Pussieux

Saclay

P. Hartmann, M. Poelker, S. Price, C. Sinclair

Accelerator, Jefferson Lab

+ Hall A, Moller Team

L'expérience HaPPEx

Un peu d'interaction faible en physique hadronique

Violation de P en diffusion $\vec{e}p \to ep$

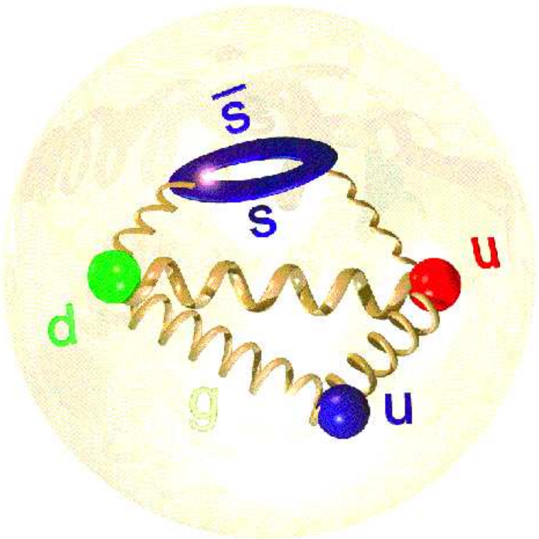
Motivation

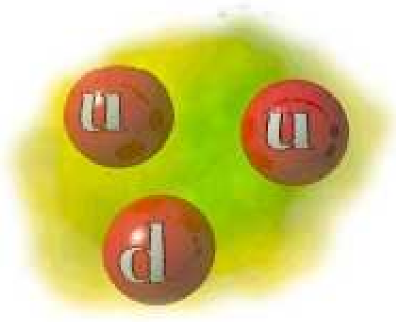
Détermination de $< N|\bar{s}\gamma_\mu s|N >$

Quark étrange et nucléon

L'expérience HaPPEx

Pourquoi ?





- $P = uud + q\bar{q} + g + \ldots$
- QCD non perturbatif
- Confinement, réseaux

- Quarks constituants
- $P = UUD$
- assez prédictif : g_a , μ_B , spectre de masse de hadrons

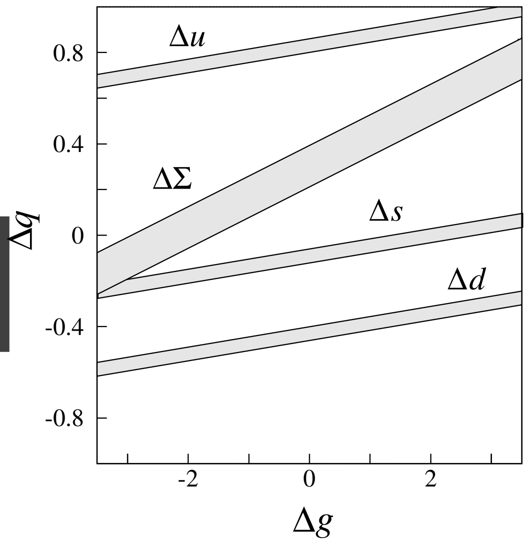
Intuition versus Expérience

Quarks constituants = Quarks QCD

$$< N|\bar{s}\Gamma_\mu s|N > = 0$$

Expérience DIS

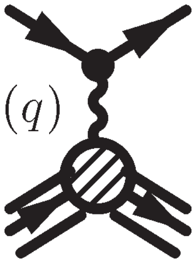
$$s^\mu < N|\bar{s}\gamma_\mu\gamma_5 s|N > = -10\% \pm 2\%$$



1. Structure N et facteurs de forme électromagnétiques
2. Structure N et facteurs de forme faibles
3. Mesure des facteurs de forme faibles en violation de P
4. L'expérience idéale
5. Éléments de détection
6. Les fausses asymétries
7. Résultats et perspectives

Facteurs de forme électromagnétiques du proton

$$-i\mathcal{M}_\gamma = (ie)^2 < p(P')|\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{EM,\mu}(0)|p(P) > \frac{-ig^{\mu\nu}}{q^2} < e(k')|\hat{\mathcal{J}}^{(e)}_{EM,\nu}(0)|e(k) >$$



$$< e(k')|\hat{\mathcal{J}}^{(e)}_{EM,\nu}(x)|e(k) > = \bar{u}(k')\gamma_\mu u(k) e^{i(k'-k).x}$$

$$< p(P')|\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{EM,\mu}(x)|p(P) > \neq \bar{\mathcal{U}}(P')\gamma_\nu \mathcal{U}(P) e^{i(P'-P).x}$$

$$< P'|\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{EM,\mu}(0)|P > = \bar{\mathcal{U}}(P')\left[\gamma_\mu F_1^{(\gamma,p)}(q^2) + \frac{i\sigma_{\mu\nu}q^\nu}{2M_N} F_2^{(\gamma,p)}(q^2)\right]\mathcal{U}(P)$$

$F_1^{(\gamma,p)}$, $F_2^{(\gamma,p)}$ *facteurs de forme électromagnétiques du proton*

Facteurs de forme électromagnétiques du proton

$F_1^{(\gamma,p)}$, $F_2^{(\gamma,p)}$ réels, $F_{1,2}^{(\gamma,p)}(Q^2 = -q^2 \geq 0)$

- Facteurs de forme de Sachs

$$G_E^{(\gamma,p)} = F_1^{(\gamma,p)} - \tau F_2^{(\gamma,p)}, \quad G_M^{(\gamma,p)} = F_1^{(\gamma,p)} + F_2^{(\gamma,p)}, \quad \tau = \frac{Q^2}{4M_N^2}.$$

TF densité de charge et d'aimantation

- Normalisations

$$G_E^{(\gamma,p)}(0) = 1, \qquad G_M^{(\gamma,p)}(0) = \mu_p = 1 + \kappa_p = 2.79.$$
$$F_1^{(P)}(0) = 1, \qquad F_2^{(p)}(0) = \kappa_p = 1.79.$$

Mesures des facteurs de forme électromagnétiques

Diffusion élastique $eN \to eN$ ou $\vec{e}N \to e\vec{N}$

Séparation de Rosenbluth ou transfert de polarisation

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_M \frac{E'}{E} \frac{1}{1+\tau} \left[{G_E^{(\gamma,p)}}^2 + \frac{\tau}{\epsilon} {G_M^{(\gamma,p)}}^2 \right].$$

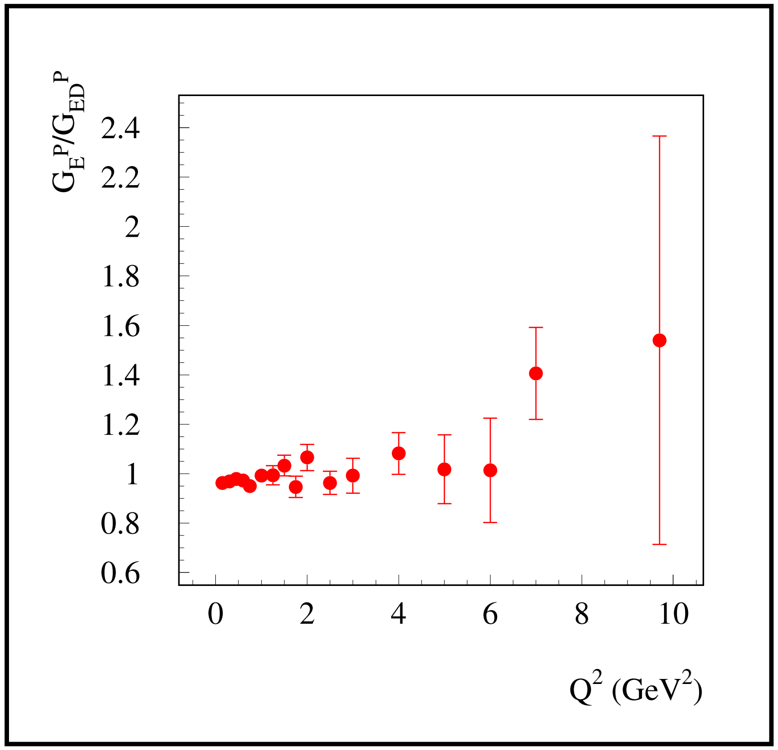
$$\frac{P_p^{\perp}}{P_p^{\parallel}} = \frac{-2M^2}{(E+E')\tan\frac{\theta}{2}} \frac{G_E^{(\gamma,p)}}{G_M^{(\gamma,p)}}$$

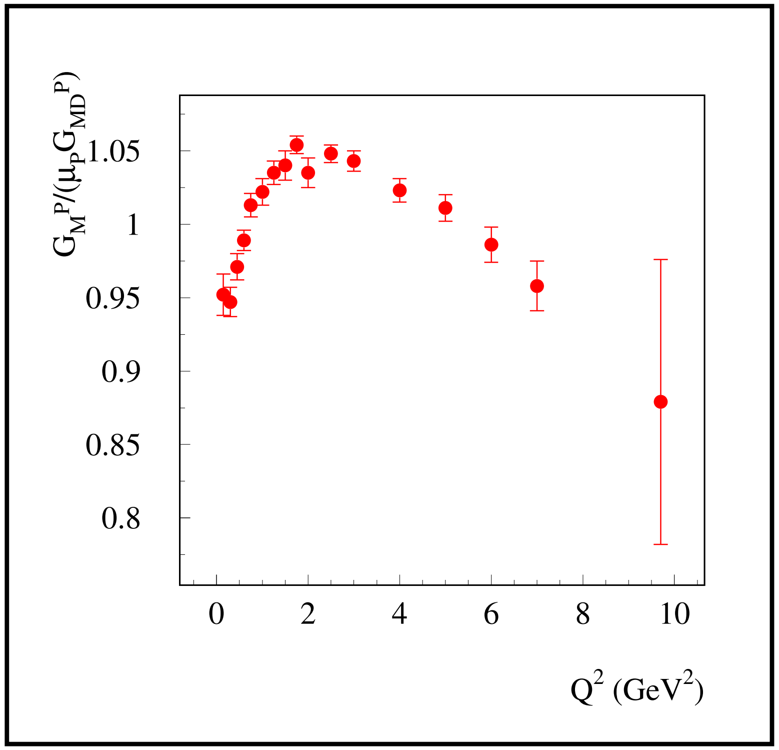
$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_M = \frac{\alpha^2 \cos^2\frac{\theta}{2}}{4E^2 \sin^4\frac{\theta}{2}}, \quad \frac{E'}{E} = \frac{1}{1 + 2\frac{E}{M}\sin^2\frac{\theta}{2}}$$

$$Q^2 = 4E^2 \frac{\sin^2\frac{\theta}{2}}{1+2\frac{E}{M}\sin^2\frac{\theta}{2}}, \quad \epsilon^{-1} = 1 + 2\,(1+\tau)\tan^2\frac{\theta}{2}$$

L'expérience HaPPEx

Facteurs de forme du proton



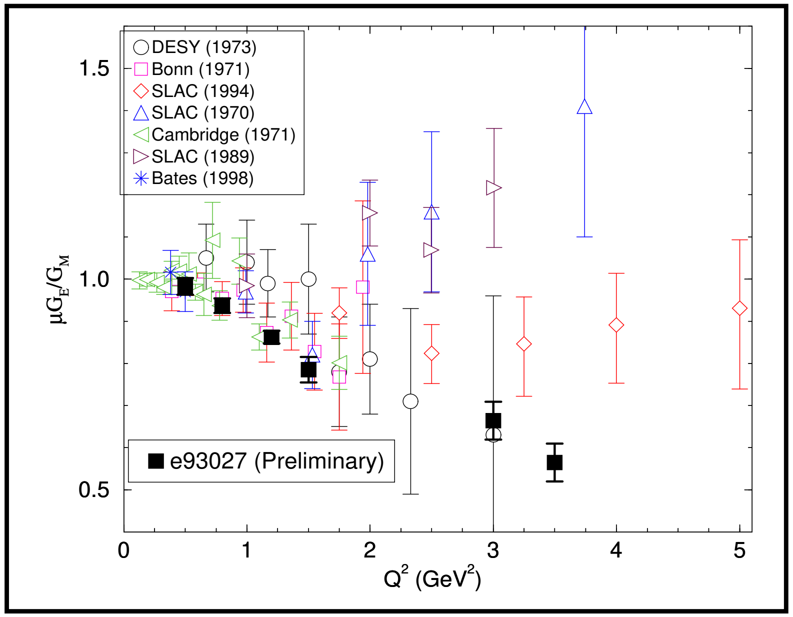


$$\left(G_E^{(\gamma,p)}\right)_D = \frac{1}{\left(1+\frac{Q^2}{{M_V}^2}\right)^2}, G_M^{(\gamma,p)} = \mu_P \left(G_E^{(\gamma,p)}\right)_D, M_V = 0.843 GeV.$$

L'expérience HaPPEx

Facteurs de forme du proton

Résultats préliminaires du Hall A @ Jlab



À haut transfert

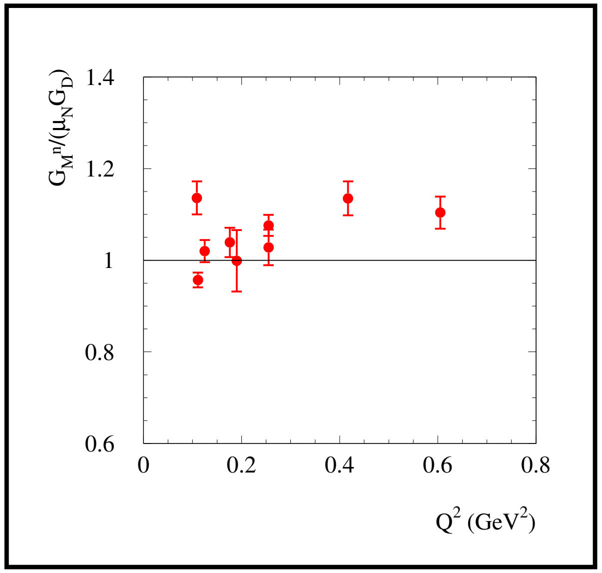
$$G_E^{(\gamma,p)} \neq \frac{1}{\left(1+\frac{Q^2}{{M_V}^2}\right)^2}$$

L'expérience HaPPEx

Facteurs de forme du neutron

Pas de cible de "n" $\Rightarrow$ d, ^3He.

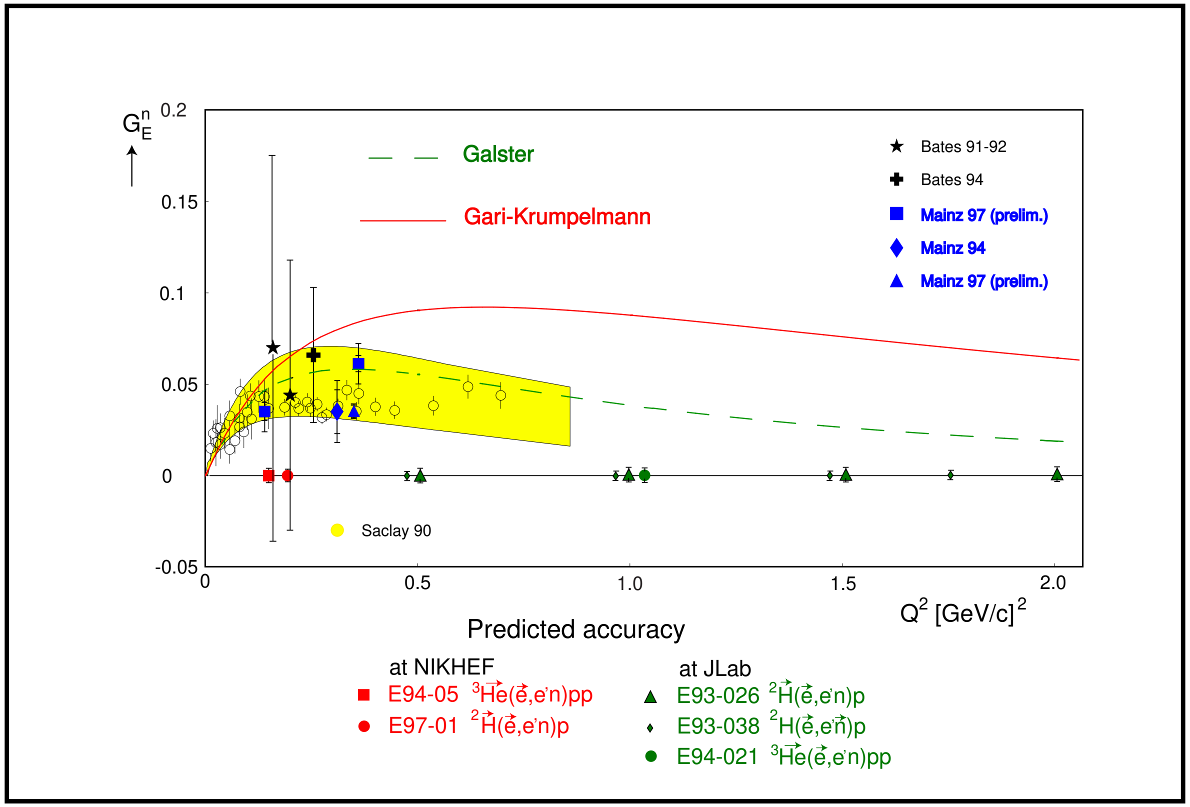
$$G_E^{(\gamma,n)}(0) = 0, \quad G_M^{(\gamma,p)}(0) = \mu_n = \kappa_n = -1.91.$$



$$G_M^{(\gamma,n)} = \mu_n \frac{1}{\left(1 + \frac{Q^2}{{M_V}^2}\right)^2}.$$

L'expérience HaPPEx

Facteur de forme électrique du neutron



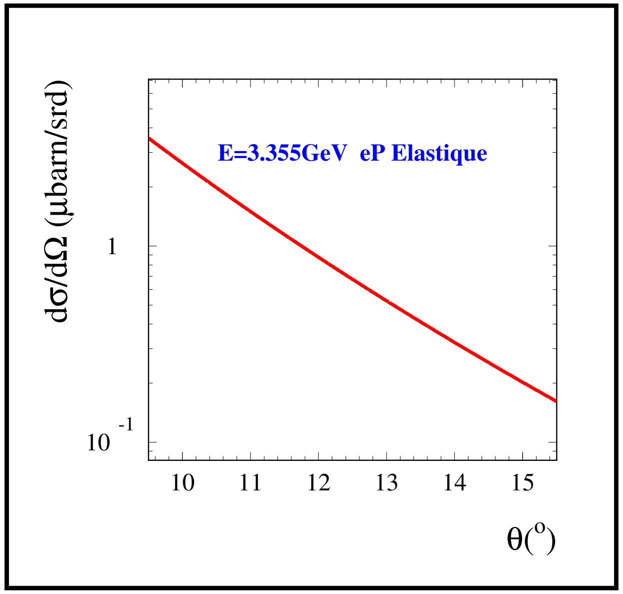
$$G_E^{(n)} = -\mu_n \tau \frac{1}{1+\alpha_n \tau} G_E^{(p)}, \alpha_n = 5.6.$$

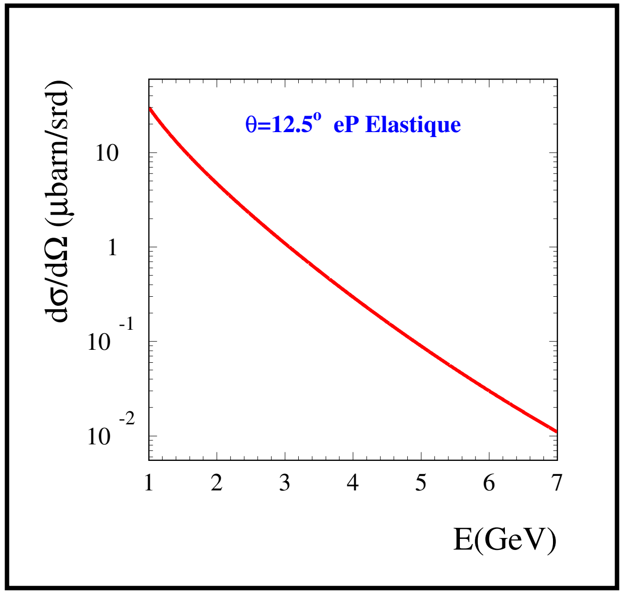
L'expérience HaPPEx

Facteurs de forme du nucléon

Les facteurs de forme électromagnétiques sont mesurés

Ordre de grandeur de la section efficace élastique *ep*





L'expérience HaPPEx

"Facteurs de forme de quarks"

$$\hat{j}^{(i)}_{E,\mu} = \bar{q}_i \gamma_\mu \mathcal{Q}_i \, q_i, \quad i = u, d, s, c, b, t$$

$$\hat{\mathcal{J}}_{E,\mu} = \sum_i \hat{j}^{(i)}_{E,\mu} = \sum_i \bar{q}_i \gamma^\mu \mathcal{Q}_i \, q_i.$$

$$< p(P')|\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{EM,\mu}(0)|p(P) > = \sum_i \mathcal{Q}_i < p(P')|\bar{q}_i \gamma_\mu q_i|p(P) >.$$

$$< p(P')|\bar{q}_i \gamma_\mu q_i|p(P) > = \bar{\mathcal{U}}(P') \left[\gamma^\mu F_1^{(i,p)} + i \frac{\sigma^{\mu\nu} q_\nu}{2M_N} F_2^{(i,p)} \right] \mathcal{U}(P)$$

$$F^{(\gamma,p)}_{1,2} = \sum_i \mathcal{Q}_i \, F^{(i,p)}_{1,2} = \frac{2}{3} F^{(u,p)}_{1,2} - \frac{1}{3} F^{(d,p)}_{1,2} - \frac{1}{3} F^{(s,p)}_{1,2}.$$

$$G^{(\gamma,p)}_{E,M} = \sum_i \mathcal{Q}_i \, G^{(i,p)}_{E,M} = \frac{2}{3} G^{(u,p)}_{E,M} - \frac{1}{3} G^{(d,p)}_{E,M} - \frac{1}{3} G^{(s,p)}_{E,M}.$$

L'expérience HaPPEx

Masse des Quarks

MeV	GeV
$2 \leq m_u \leq 8$	$1 \leq m_c \leq 1.6$
$5 \leq m_d \leq 15$	$4 \leq m_b \leq 4.5$
$100 \leq m_s \leq 300$	$168 \leq m_t \leq 192$

Proton et Neutron

Symétrie Isospin

$$F_{1,2}^{(u,p)} = F_{1,2}^{(d,n)}; \quad F_{1,2}^{(d,p)} = F_{1,2}^{(u,n)}; \quad F_{1,2}^{(s,p)} = F_{1,2}^{(s,n)}.$$

$$\begin{aligned} F_{1,2}^{(\gamma,p)} &= \frac{2}{3} F_{1,2}^{(u)} - \frac{1}{3} F_{1,2}^{(d)} - \frac{1}{3} F_{1,2}^{(s)}, \\ F_{1,2}^{(\gamma,n)} &= \frac{2}{3} F_{1,2}^{(d)} - \frac{1}{3} F_{1,2}^{(u)} - \frac{1}{3} F_{1,2}^{(s)}. \end{aligned}$$

Générateurs SU(3)

$$\begin{aligned} F_{1,2}^{(0)} &= \frac{1}{3}\left(F_{1,2}^{(u)} + F_{1,2}^{(d)} + F_{1,2}^{(s)}\right), \\ F_{1,2}^{(3)} &= \frac{1}{2}\left(F_{1,2}^{(u)} - F_{1,2}^{(d)}\right), \\ F_{1,2}^{(8)} &= \frac{1}{2\sqrt{3}}\left(F_{1,2}^{(u)} + F_{1,2}^{(d)} - 2F_{1,2}^{(s)}\right). \end{aligned}$$

Proton et Neutron

$$F_{1,2}^{(\gamma,p)} + F_{1,2}^{(\gamma,n)} = \frac{2}{\sqrt{3}} F_{1,2}^{(8)} = \frac{1}{3}\left(F_{1,2}^{(u)} + F_{1,2}^{(d)} - 2F_{1,2}^{(s)}\right),$$

$$F_{1,2}^{(\gamma,p)} - F_{1,2}^{(\gamma,n)} = 2F_{1,2}^{(3)} = F_{1,2}^{(u)} - F_{1,2}^{(d)}.$$

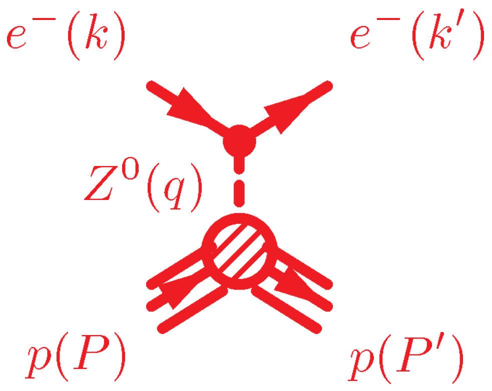
Normalisations ($Q^2 = 0$)

$$F_1^{(3)}(0) = \frac{1}{2}, \qquad F_1^{(8)}(0) = \frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$F_2^{(3)}(0) = \frac{1}{2}\left(\kappa_p - \kappa_n\right), \quad F_2^{(8)}(0) = \frac{\sqrt{3}}{2}\left(\kappa_p + \kappa_n\right),$$

$$F_1^{(0)}(0) = 1,\ NombreBaryonique, \quad F_2^{(0)} =??\ ou\ F_2^{(s)}(0) =??$$

Facteurs de forme faibles neutres du proton



g couplage $W_\mu^{(1,2,3)}$,
$g'/2$ couplage B_μ (hypercharge),
θ_W l'angle de Weinberg.

$$-i\mathcal{M}_{Z^0} = \left(-i\frac{g}{\cos\theta_W}\right)^2 < p(P')|\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{F,\mu}(0)|p(P) > \frac{-i\left(g^{\mu\nu} - \frac{q^\mu q^\nu}{M_z^2}\right)}{q^2 - M_Z^2} < e(k')|\hat{\mathcal{J}}^{(e)}_{F,\nu}(0)|e(k) >$$

$$< e(k')|\hat{\mathcal{J}}^{(e)}_{F,\nu}|e(k) > = \bar{u}(k')\left(\frac{1}{4}\left[\left(-1+4\sin^2\theta_W\right)\gamma_\nu + \gamma_\nu\gamma_5\right]\right)u(k).$$

$$< P'|\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{F,\mu}|P > = ??$$

L'expérience HaPPEx

Facteurs de forme faibles neutres du proton

$$< P'|\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{F,\mu}|P > = \bar{\mathcal{U}}'\Gamma_\mu \mathcal{U}$$

$$\Gamma_\mu = \left[\gamma_\mu F_1^{(Z)} + \frac{i\sigma_{\mu\nu}q^\nu}{2M_N}F_2^{(Z)} + \gamma_\mu\gamma_5 G_1^{(Z)} + \frac{q_\mu\gamma_5}{M_N}G_P^{(Z)}\right].$$

$F_{1,2}^{(Z)}$ *facteurs de forme vectoriels faibles* de Pauli-Dirac du proton.

$G_1^{(Z)}$,$G_P^{(Z)}$ *facteurs de forme axial et pseudoscalaire induit.*

Facteurs de forme vectoriels faibles de Sachs

$$G_E^{(Z)} = F_1^{(Z)} - \tau F_2^{(Z)},$$

$$G_M^{(Z)} = F_1^{(Z)} + F_2^{(Z)}.$$

Courants faibles des quarks

Couplage quark-Z^0

$$\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{F,\mu} = \sum_i \left[\bar{q}_i \gamma_\mu q_i \left(\frac{1}{2} T_i^{(3)} - \mathcal{Q}_i \sin^2\theta_W \right) - \frac{1}{2} T_i^{(3)} \bar{q}_i \gamma_\mu \gamma^5 q_i \right].$$

$$\hat{\jmath}^{(i)}_{V,\mu} = \bar{q}_i \gamma_\mu q_i, \quad \hat{\jmath}^{(i)}_{A,\mu} = \bar{q}_i \gamma_\mu \gamma^5 q_i.$$

$$< P' | \hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{F,\mu} | P > = \sum_i \left[c_V^{(i)} < P' | \hat{\jmath}^{(i)}_{V,\mu} | P > + c_A^{(i)} < P' | \hat{\jmath}^{(i)}_{A,\mu} | P > \right],$$

$$c_V^{(i)} = \left(\frac{1}{2} T_i^{(3)} - \mathcal{Q}_i \sin^2\theta_W \right), \quad c_A^{(i)} = -\frac{1}{2} T_i^{(3)}.$$

”Facteurs de forme de quarks”

$$< p(P')|\bar{q}_i\gamma^\mu q_i|p(P) > = \bar{\mathcal{U}}(P')\left[\gamma^\mu F_1^{(i)} + i\frac{\sigma^{\mu\nu}q_\nu}{2M_N}F_2^{(i)}\right]\mathcal{U}(P).$$

$$< p(P')|\bar{q}_i\gamma^\mu\gamma_5 q_i|P(p) > = \bar{\mathcal{U}}(p')\left[\gamma^\mu\gamma_5 G_1^{(i)} + \frac{q_\nu}{M_N}\gamma_5 G_P^{(i)}\right]\mathcal{U}(p).$$

$$F_{1,2}^{(Z)} = \sum_i\left(\frac{1}{2}T_i^{(3)} - \mathcal{Q}_i\ \sin^2\theta_W\right)F_{1,2}^{(i)}.$$

$$G_{1,P}^{(Z)} = \sum_i\left(-\frac{1}{2}T_i^{(3)}\right)G_{1,P}^{(i)}.$$

"Facteurs de forme de quarks"

$$F_{1,2}^{(Z)} = \left(+\tfrac{1}{4} - \tfrac{2}{3}\sin^2\theta_W\right) F_{1,2}^{(u)} + \left(-\tfrac{1}{4} + \tfrac{1}{3}\sin^2\theta_W\right)\left(F_{1,2}^{(d)} + F_{1,2}^{(s)}\right).$$

$$\begin{aligned} F_{1,2}^{(\gamma,p)} &= \frac{2}{3}F_{1,2}^{(u)} - \frac{1}{3}F_{1,2}^{(d)} - \frac{1}{3}F_{1,2}^{(s)}. \\ F_{1,2}^{(\gamma,n)} &= \frac{2}{3}F_{1,2}^{(d)} - \frac{1}{3}F_{1,2}^{(u)} - \frac{1}{3}F_{1,2}^{(s)}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{1,2}^{(Z,p)} &= \frac{1}{4}\left[\left(2 - 4\sin^2\theta_W\right) F_{1,2}^{(\gamma,p)} - F_{1,2}^{(0)}\right] \\ F_{1,2}^{(Z,p)} &= \frac{1}{4}\left[\left(1 - 4\sin^2\theta_W\right) F_{1,2}^{(\gamma,p)} - F_{1,2}^{(\gamma,n)} - F_{1,2}^{(s)}\right]. \end{aligned}$$

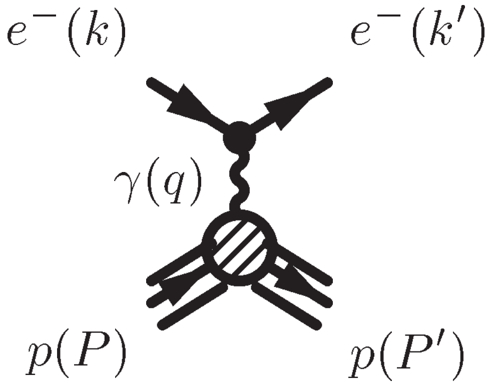
$$\boxed{\text{Mesures de } F_{1,2}^{(Z)} \Rightarrow F_{1,2}^{(s)}}$$

$$G_{1,P}^{(Z)} = -\frac{1}{4}G_{1,P}^{(u)} + \frac{1}{4}G_{1,P}^{(d)} + \frac{1}{4}G_{1,P}^{(s)}.$$

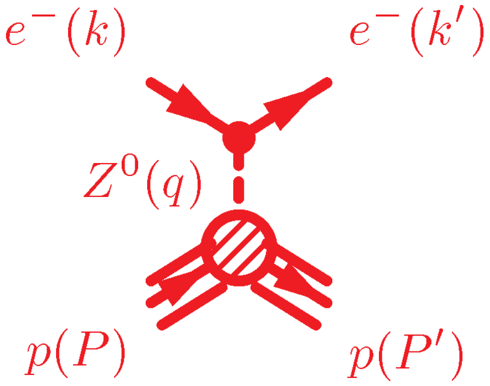
L'expérience HaPPEx

Mesure des facteurs de forme faibles

Diffusion élastique $ep \to ep$



$+$



$$\mathcal{M} = \mathcal{M}_\gamma + \mathcal{M}_{Z^0}, \quad \sigma_{ep\to ep} \propto |\mathcal{M}_\gamma + \mathcal{M}_{Z^0}|^2.$$

Diffusion élastique $\Rightarrow Q^2 \simeq 1 GeV^2 \ll M_Z^2$

$$\frac{-i\left(g^{\mu\nu} - \frac{q_\mu q_\nu}{M_z^2}\right)}{q^2 - M_Z^2} \simeq \frac{i g^{\mu\nu}}{M_Z^2}, \quad G_F = \frac{\sqrt{2} g^2}{8\cos^2\theta_W M_Z^2}.$$

L'expérience HaPPEx

Mesure des facteurs de forme faibles

$$-i\mathcal{M}_{Z^0} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} < P'|\hat{\mathcal{J}}^{(p)}_{F,\mu}|P > \bar{u}(k') \left(\left[\left(-1 + 4\sin^2\theta_W \right) \gamma^\mu + \gamma^\mu \gamma_5 \right] \right) u(k).$$

$$|\mathcal{M}_\gamma| \propto \frac{\alpha}{Q^2}, \quad |\mathcal{M}_{Z^0}| \propto G_F,$$

$$\sigma_{ep\to ep} = |\mathcal{M}_\gamma|^2 + 2\mathcal{R}e\left(\mathcal{M}_\gamma \mathcal{M}_{Z^0}{}^*\right) + |\mathcal{M}_{Z^0}|^2$$

$$\sigma_{ep\to ep} = (\ldots)\frac{\alpha^2}{Q^4} + (\ldots)\, G_F \frac{\alpha}{Q^2} + (\ldots)\, G_F^2.$$

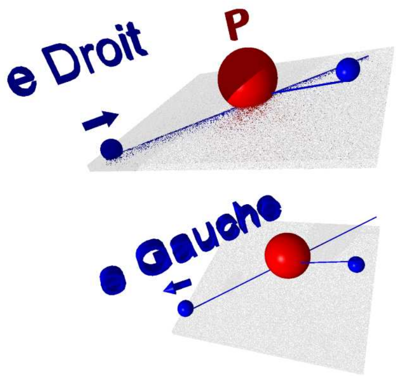
$$|\mathcal{M}_\gamma|^2 \gg \mathcal{R}e\left(\mathcal{M}_\gamma \mathcal{M}_{Z^0}{}^*\right) \gg |\mathcal{M}_{Z^0}|^2, \quad Q^2 = 1GeV^2.$$

$$\frac{\mathcal{R}e\left(\mathcal{M}_\gamma \mathcal{M}_{Z^0}{}^*\right)}{|\mathcal{M}_\gamma|^2} \propto \frac{G_F}{\sqrt{2}\pi\alpha} Q^2 \simeq 300ppm \quad Q^2 = 1GeV^2.$$

L'expérience HaPPEx

Mesure des facteurs de forme faibles

Violation de parité $\vec{e}p \rightarrow ep$



$$A_{PV}(\theta) = \frac{\frac{d\sigma_{ep}^{D}}{d\Omega}(\theta) - \frac{d\sigma_{ep}^{G}}{d\Omega}(\theta)}{\frac{d\sigma_{ep}^{D}}{d\Omega}(\theta) + \frac{d\sigma_{ep}^{G}}{d\Omega}(\theta)}$$

$$\overline{|\mathcal{M}_\gamma^D|^2} = \frac{1}{2}\sum_S \sum_{S'} \sum_{s'} |\mathcal{M}_\gamma^D|^2, \quad \overline{\mathcal{M}_\gamma^{*D}\mathcal{M}_{Z^0}^D} = -\overline{\mathcal{M}_\gamma^{*L}\mathcal{M}_{Z^0}^L}.$$

$$A_{PV}(\theta) \simeq \frac{\mathcal{R}e\left(\overline{\mathcal{M}_\gamma^{*D}\mathcal{M}_{Z^0}^D}\right)}{\overline{|\mathcal{M}_\gamma^D|^2}} \propto \frac{G_F}{\sqrt{2}\pi\alpha} Q^2 \simeq 300ppm \quad Q^2 = 1GeV^2.$$

L'expérience HaPPEx

Mesure des facteurs de forme faibles

"straightforward calculation ..."

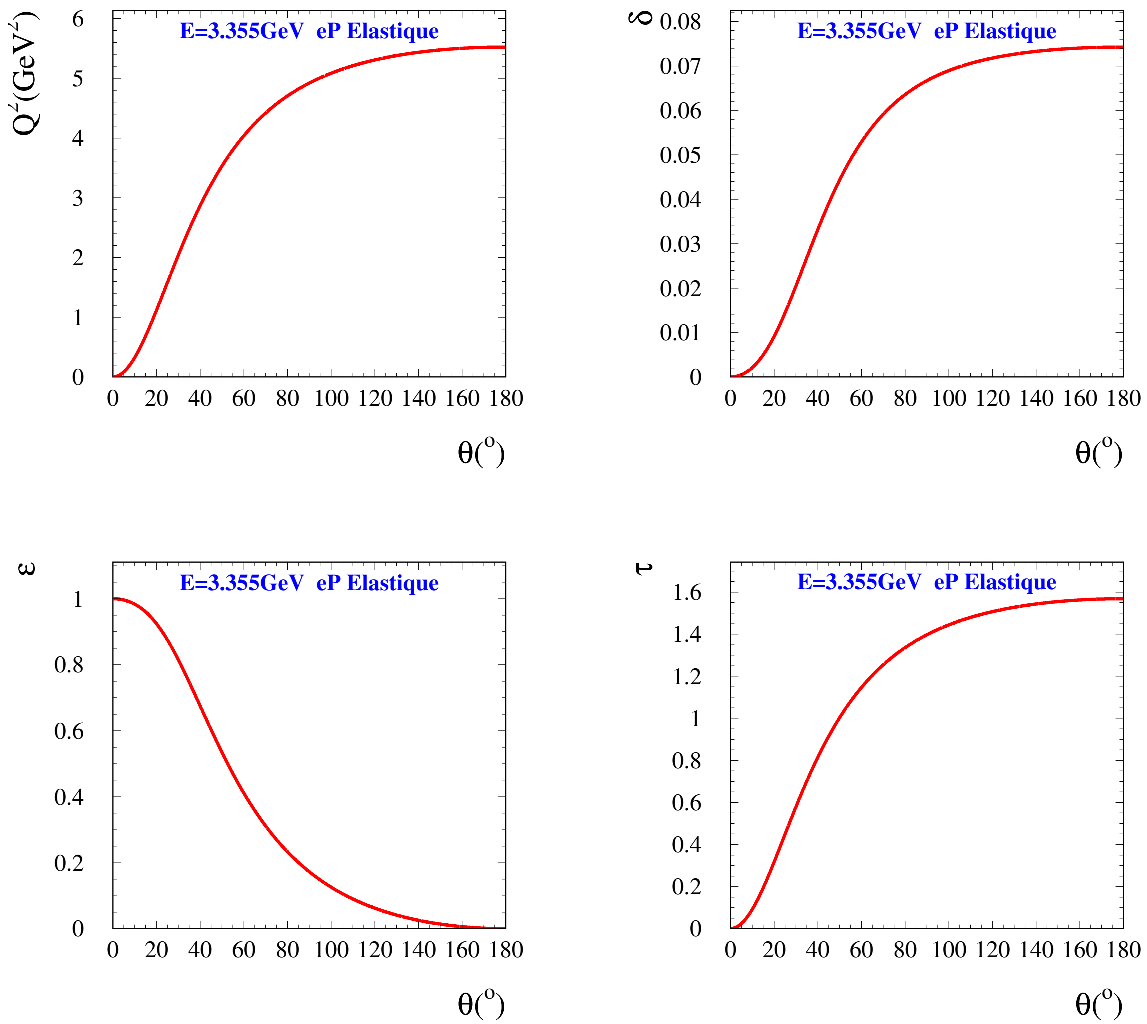
$$A_{PV} = -\frac{G_F Q^2}{\sqrt{2}\pi\alpha} \frac{\epsilon G_E^{(\gamma,p)} G_E^{(Z,p)} + \tau G_M^{(\gamma,p)} G_M^{(Z,p)} - \delta G_M^{(\gamma,p)} G_1^{(Z,p)}}{\epsilon G_E^{(\gamma,p)2} + \tau G_M^{(\gamma,p)2}}$$

Facteurs cinématiques

$$\tau = \frac{Q^2}{4M^2}, \quad \epsilon = \frac{1}{1 + 2\,(1+\tau)\tan^2\frac{\theta}{2}},$$

$$\delta = \frac{1}{2}\left(1 - 4\sin^2\theta_W\right)\sqrt{1-\epsilon^2}\sqrt{\tau\,(1+\tau)}.$$

L'expérience HaPPEx



L'expérience HaPPEx

Mesure des facteurs de forme faibles

Séparation quark étrange

$$A_{PV} = A_{PV}^{(0)} \left(1 - \Delta A^{(s)}\right).$$

$$A_{PV}^{(0)} = \left(\epsilon A_{PV}^{(E,0)} + \tau A_{PV}^{(M,0)} - \delta A_{PV}^{(A,0)}\right),$$

$$A_{PV}^{(E,0)} = -\frac{G_F Q^2}{\sqrt{2}\pi\alpha} \frac{G_E^{(\gamma,p)} \left[\left(1 - 4\sin^2\theta_W\right) G_E^{(\gamma,p)} - G_E^{(\gamma,n)}\right]}{4\left(\epsilon G_E^{(\gamma,p)2} + \tau G_M^{(\gamma,p)2}\right)},$$

$$A_{PV}^{(M,0)} = -\frac{G_F Q^2}{\sqrt{2}\pi\alpha} \frac{G_M^{(\gamma,p)} \left[\left(1 - 4\sin^2\theta_W\right) G_M^{(\gamma,p)} - G_M^{(\gamma,n)}\right]}{4\left(\epsilon G_E^{(\gamma,p)2} + \tau G_M^{(\gamma,p)2}\right)},$$

$$A_{PV}^{(A,0)} = -\frac{G_F Q^2}{\sqrt{2}\pi\alpha} \frac{2G_M^{(\gamma,p)} G_A}{4\left(\epsilon G_E^{(\gamma,p)2} + \tau G_M^{(\gamma,p)2}\right)}.$$

L'expérience HaPPEx

Mesure des facteurs de forme faibles

$$\Delta A^{(s)} = \frac{1}{4} \frac{G_E^{(s)} + \frac{\tau G_M^{(\gamma,p)}}{\epsilon G_E^{(\gamma,p)}} G_M^{(s)} + \frac{\delta G_M^{(\gamma,p)}}{\epsilon G_E^{(\gamma,p)}} G_1^{(s)}}{G_E^{(Z,p,s=0)} + \frac{\tau G_M^{(\gamma,p)}}{\epsilon G_E^{(\gamma,p)}} G_M^{(Z,p,s=0)} + \frac{\delta G_M^{(\gamma,p)}}{\epsilon G_E^{(\gamma,p)}} G_1^{(s=0)}}$$

$$G_{E,M}^{(Z,p,s=0)} = \frac{1}{4}\left[\left(1 - 4\sin^2\theta_W\right) G_{E,M}^{(\gamma,p)} - G_{E,M}^{(\gamma,n)}\right]$$

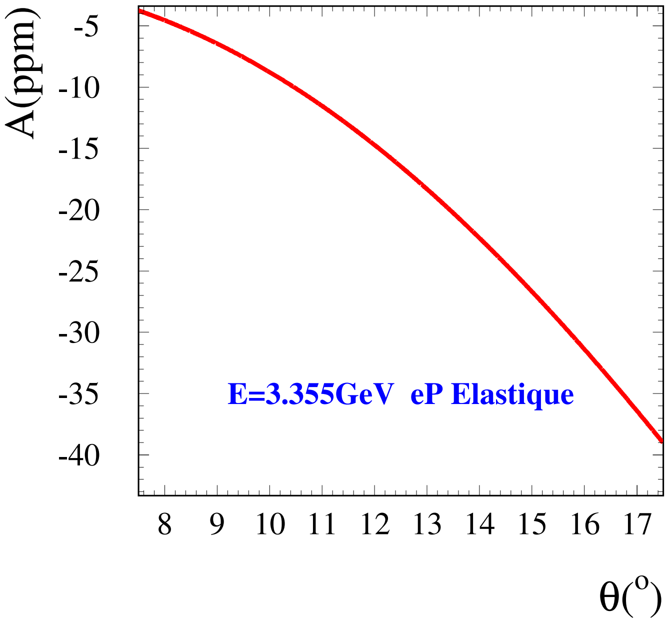
$$G_1^{(s=0)} = -\frac{1}{4}\left(G_1^{(u)} - G_1^{(d)}\right) = -\frac{1}{2} g_A$$

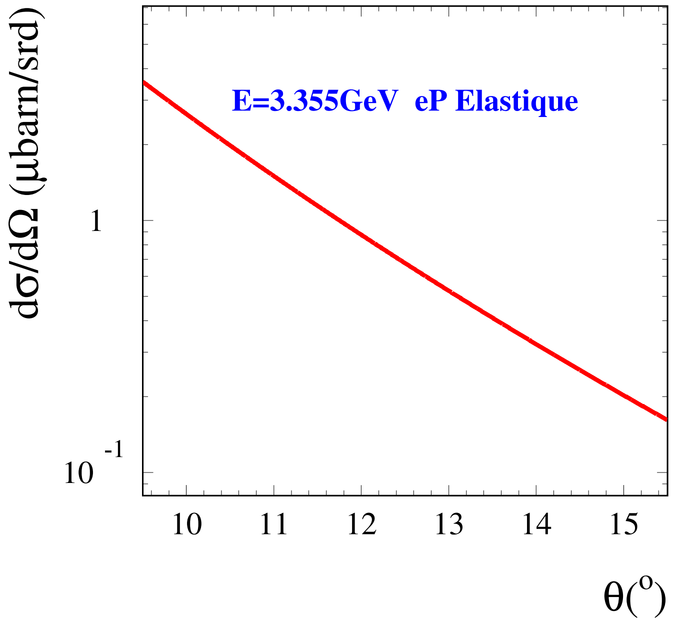
Une expérience de violation de parité mesure

$$G_E^{(s)} + \left[\frac{\tau G_M^{(\gamma,p)}}{\epsilon G_E^{(\gamma,p)}}\right] G_M^{(s)} + \left[\frac{\delta G_M^{(\gamma,p)}}{\epsilon G_E^{(\gamma,p)}}\right] G_1^{(s)}.$$

L'expérience HaPPEx

Asymétrie "modèle standard"





L'expérience idéale

- Polarisation $P_e^+ = \frac{N_e^D - N_e^G}{N_e^D + N_e^G} > 0$

$$N_{ep}^+ = \mathcal{L}^+ \frac{d\sigma_0}{d\Omega} \left(1 + P_e^+ A_{PV}\right) \Delta\Omega^+ T^+.$$

$$\mathcal{L}^+ = \frac{I_e^+}{e} \frac{(\rho L)^+}{A} \mathcal{N}_A, \quad \frac{d\sigma_0}{d\Omega} = \frac{1}{2} \left(\frac{d\sigma_{ep}^D}{d\Omega} + \frac{d\sigma_{ep}^G}{d\Omega} \right).$$

- Polarisation $-P_e^- < 0$

$$N_{ep}^- = \mathcal{L}^- \frac{d\sigma_0}{d\Omega} \left(1 - P_e^- A_{PV}\right) \Delta\Omega^- T^-.$$

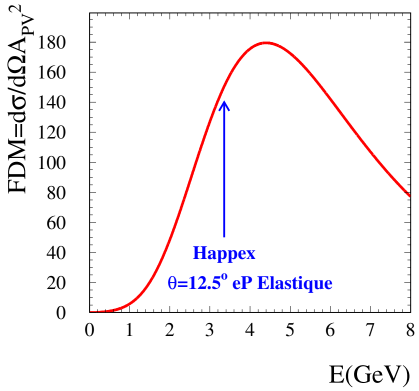
$$A_{exp} = \frac{N_{ep}^+ - N_{ep}^-}{N_{ep}^+ + N_{ep}^-} \simeq P_e A_{PV}, \quad P_e = \frac{P_e^+ + P_e^-}{2}.$$

L'expérience HaPPEx

Figure de Mérite

$$\frac{\sigma(A_{PV})}{A_{PV}} \simeq \frac{1}{\sqrt{N_T}} \frac{1}{P_e A_{PV}}$$

$$\frac{\sigma(A_{PV})}{A_{PV}} = \frac{1}{\sqrt{\mathcal{L} T \frac{d\sigma_0}{d\Omega} \Delta\Omega}} \frac{1}{P_e A_{PV}}$$



$$FDM = A_{PV}^2 \frac{d\sigma_0}{d\Omega}, \quad T = \frac{1}{FDM} \frac{1}{P_e^2} \frac{1}{\left(\frac{\sigma(A_{PV})}{A_{PV}}\right)^2} \frac{1}{\Delta\Omega} \frac{1}{\mathcal{L}}.$$

$$A_{PV} = -10ppm, \quad \frac{\sigma(A_{PV})}{A_{PV}} = 10\%, \quad P_e = 50\% \Rightarrow N_T = 4\ 10^{12}$$

$$\frac{dN}{dt} = 260 Hz L(cm) I(\mu A) \frac{d\sigma}{d\Omega}(\mu b/sr)\Omega(msr)$$

L'expérience HaPPEx

La "shopping list"

- $\vec{e}$: $I_e P_e^2 \gg 1$, renversements P_e fréquents.
- LH_2: dense, longue et refroidie.
- Détecteur e^-: taux de comptage élevés, identification diffusion élastique, grand angle solide.
- Monitorage faisceau et détecteurs : minimiser les fausses asymétries.
- Polarimètre .

Conditions pour HAPPEX

$$E = 3.355\, GeV, \quad \theta = 12.5^o, \quad Q^2 = 0.47 \;\; GeV^2$$

$$A^0_{PV} \simeq -16\, ppm$$

Technique expérimentale

- **C. Prescott et al**, PV $\vec{e}D \rightarrow eX$, ($A_{PV} = 160 \pm 25 ppm$), PL 77B (1978) 347.
- **P. Souder et al**, PV $\vec{e}12^C \rightarrow e12^C$, ($A_{PV} = 0.60 \pm 0.15 ppm$), PRL 65 (1990) 694.

5 Éléments de détection

(a) CEBAF $\vec{e}$

(b) Le Hall A

(c) Source $\vec{e}$

(d) Polarimétrie

(e) Cible LH_2

(f) Détecteurs

6 Les fausses asymétries

(a) Intensité

(b) Position, angle et énergie

(c) Piedestaux et non-linéariés

(d) Polarimètrie

(e) $Q^2 =??$

(f) Bruits

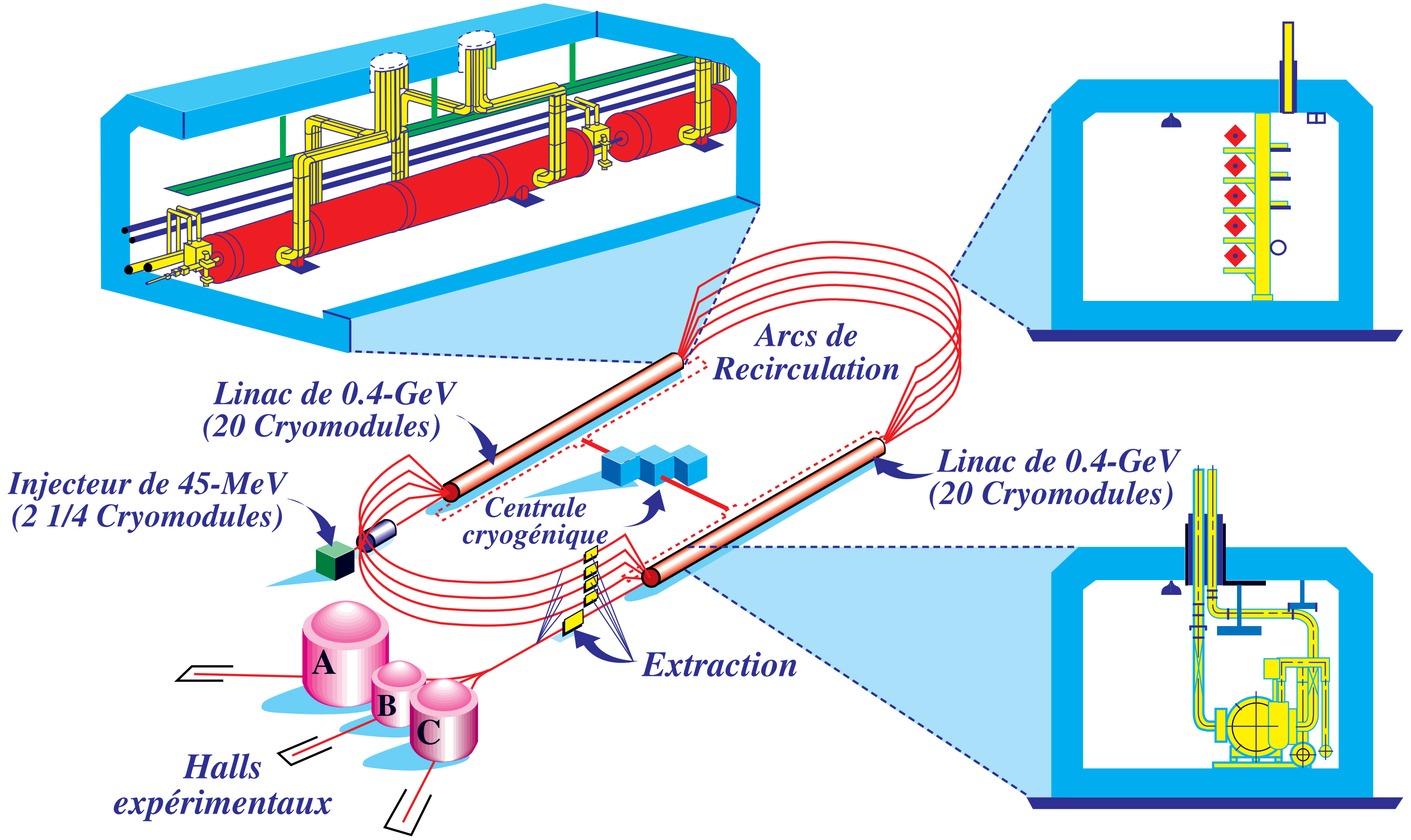
Le Laboratoire Jefferson

Continuous Electron Beam Accelerator Facility

L'expérience HaPPEx

Le Laboratoire Jefferson

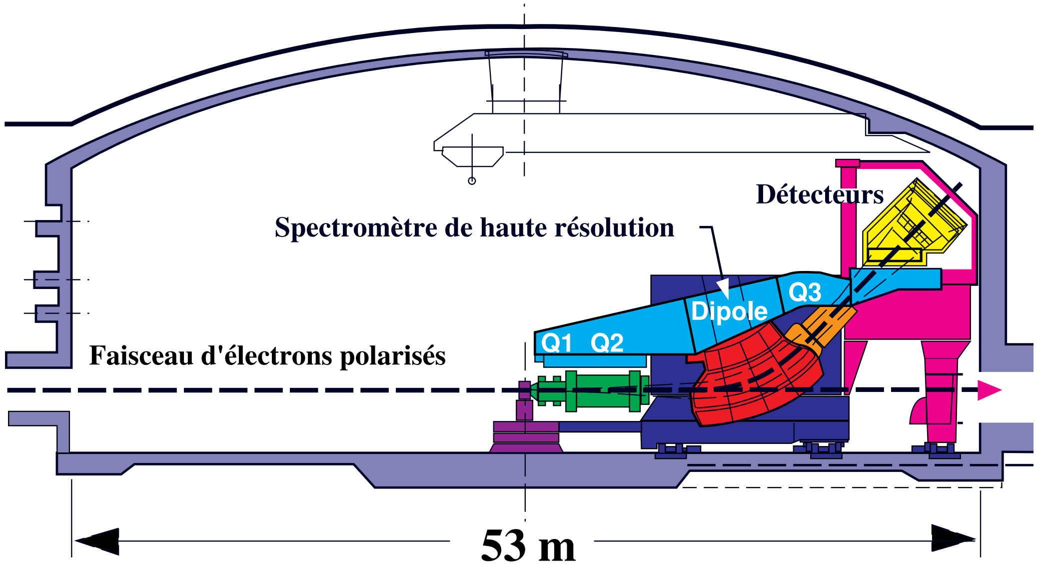
Continuous Electron Beam Accelerator Facility



L'expérience HaPPEx

Le Laboratoire Jefferson

Le Hall A

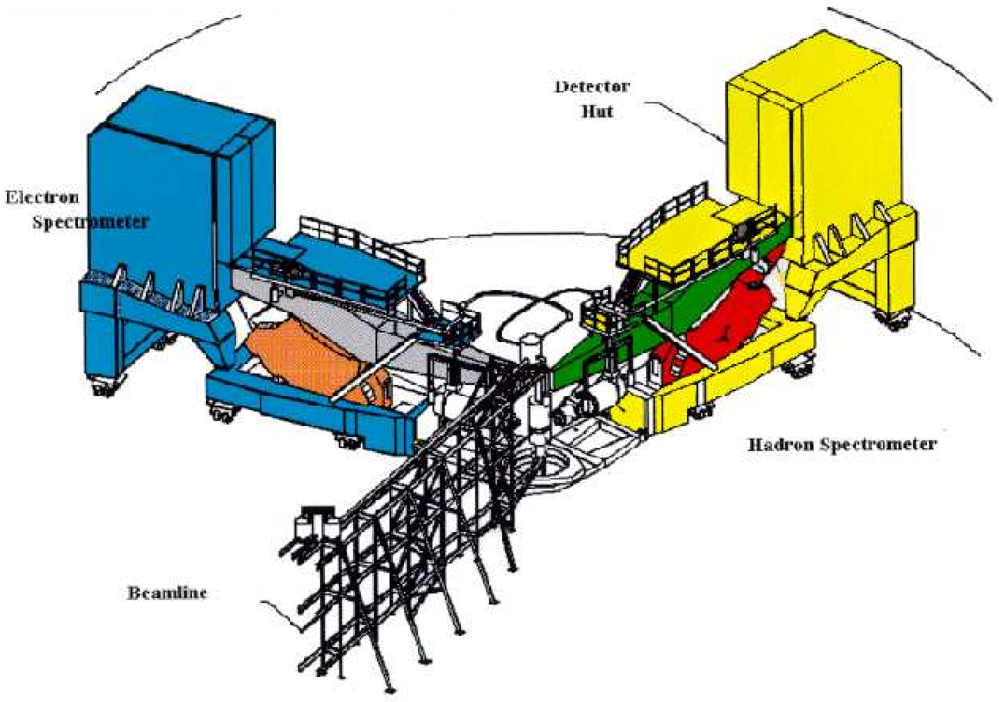


Nombreuses contributions du DAPNIA

- VCS, HaPPEx
- Q_1, Čerenkov, Mesures E, QMM, Compton

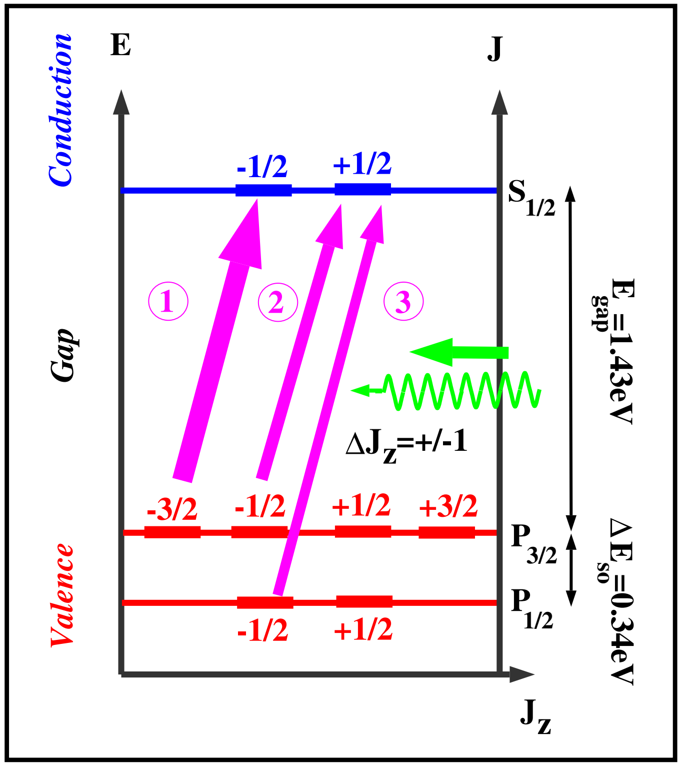
Le Laboratoire Jefferson

Le Hall A



L'expérience HaPPEx

Source $\vec{e}^-$: Pompage Optique AsGa ($P_{\frac{3}{2}} \rightarrow S_{\frac{1}{2}}$)



- $\frac{\mathcal{P}(T_1)}{\mathcal{P}(T_2)} = 3, \ \frac{\mathcal{P}(T_3)}{\mathcal{P}(T_2)} = 2.$
- $E_{gap} < h\nu < E_{gap} + \Delta E_{SO}$, $P_e = \frac{3-1}{3+1} = 50\%.$
- diffusion vers la surface
- émission dans le vide (Cs, $AE = 1.4eV \rightarrow -0.4eV$)
- $AsGa_{72\%}P_{28\%}$ ($P_e \simeq 100\%$)

L'expérience HaPPEx

Source $\vec{e}^-$: renversement de la polarisation

renversement polarisation des photons

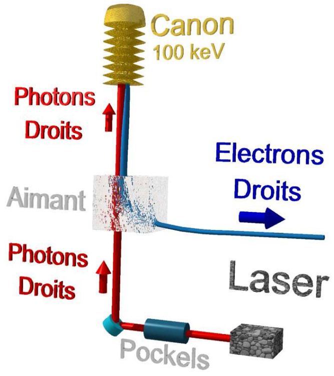
cellule de Pockels ($100 \mu s$)

Electro-optique

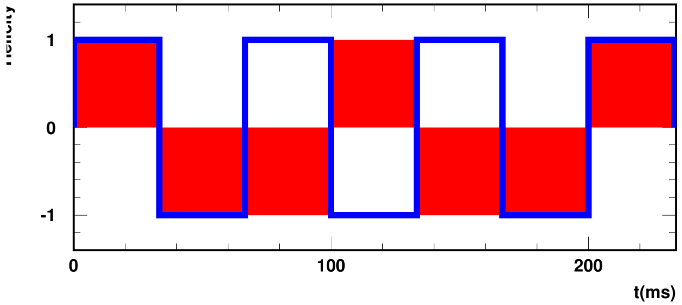
$V_{\pm} \rightarrow \pm \frac{\lambda}{4}$

Linéaire $\rightarrow$ circulaire D/G

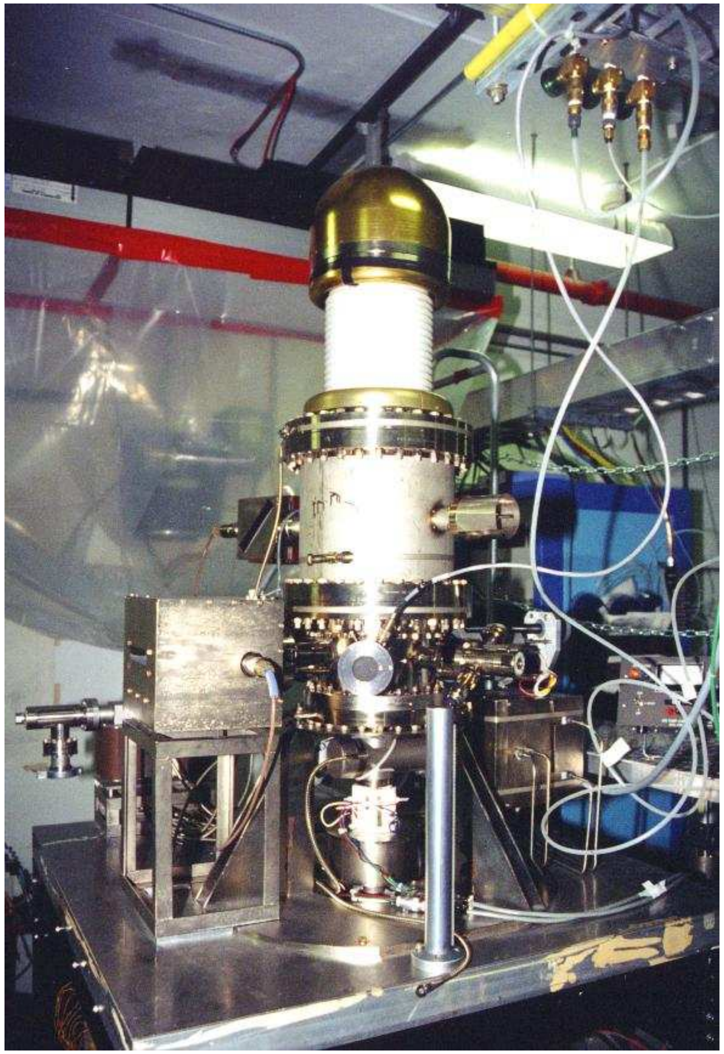
$\rightarrow$ électrons droits/gauches



Renversement aléaloire à 30 Hz (en phase avec le 60 Hz)



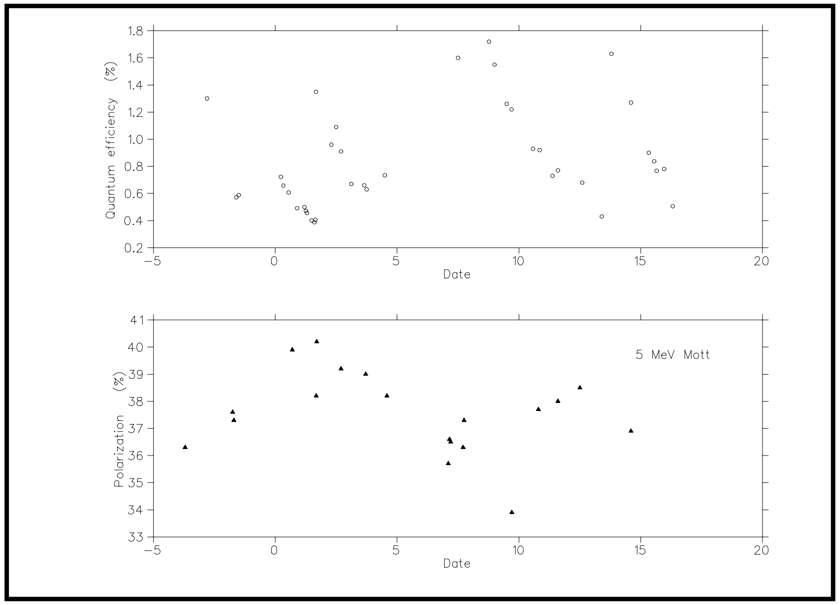
L'expérience HaPPEx



L'expérience HaPPEx

Source $\vec{e}^{\,-}$

$$QE = \frac{\frac{dn_e}{dt}}{\frac{dn_\gamma}{dt}}, \quad I_e = QE\,\frac{P(W)}{h\nu(eV)}.$$



$$QE = 1\%,\, P = 25mW,\, h\nu = 1.59eV \Rightarrow I_e = 150\mu A$$

L'expérience HaPPEx

Polarimètre Moller : $\vec{e}\vec{e} \to ee$

Cible mince alliage Fer-Cobalt magnétisé

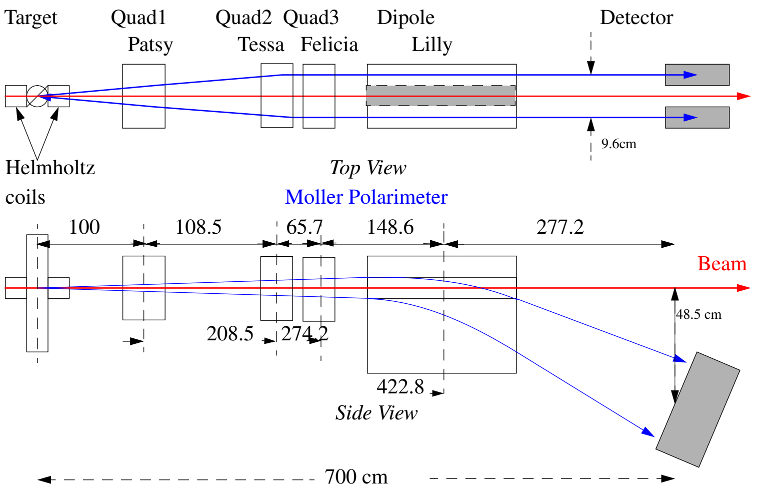
$$\frac{d\sigma}{d\overline{\Omega}} = \frac{d\sigma_0}{d\overline{\Omega}} \left[1 + a_{zz} P_e P_T\right].$$

$$\frac{d\sigma_0}{d\overline{\Omega}} = Z r_0^2 \left[\frac{\left(1+\cos\overline{\theta}\right)\left(\sin^2\overline{\theta}-4\right)}{2\sin^2\overline{\theta}}\right]^2.$$

$$a_{zz} = \sin^2\overline{\theta}\,\frac{\sin^2\overline{\theta}-8}{\left(\sin^2\overline{\theta}-4\right)^2}.$$

$$a_{zz}^{max} = -7/9,\;\; \overline{\theta} = \overline{\theta}_{sym} = 90^o,\;\; \theta_{sym} = \tan^{-1}\sqrt{\frac{2m}{E+m}} \ll 1.$$

Polarimètre Moller : $\vec{e}\vec{e} \rightarrow ee$



- rapide
- destructif
- limité à $10\mu A$.
- précision $\simeq \pm 3\%$ (P_T)

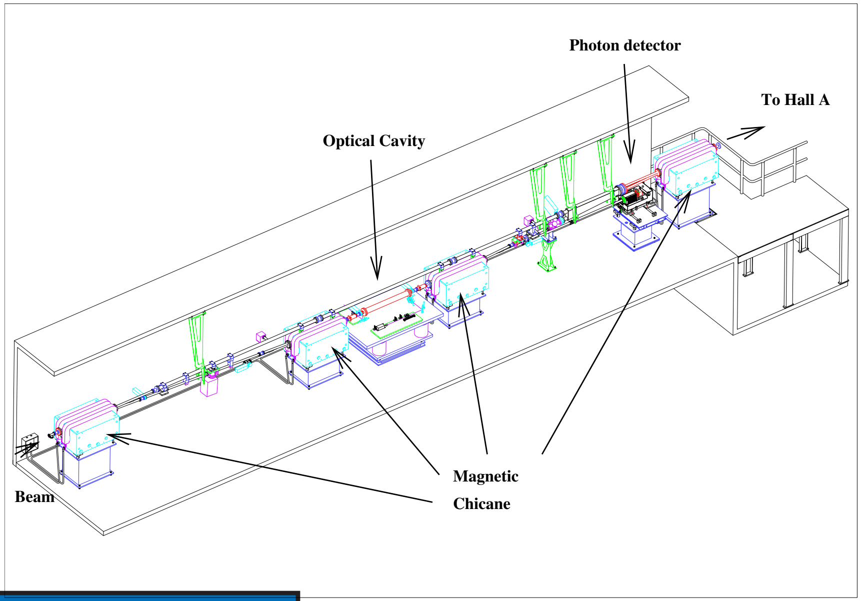
L'expérience HaPPEx

Polarimètre Compton : $\vec{e}\vec{\gamma} \rightarrow e\gamma$

$$\frac{d\sigma}{d\rho} = 2\pi r_0^2 a \left[\frac{\rho^2(1-a)^2}{1-\rho(1-a)} + 1 + \left(\frac{1-\rho(1+a)}{1-\rho(1-a)} \right)^2 \right],$$

$$A_c = \frac{2\pi r_0^2 a}{\frac{d\sigma}{d\rho}} (1-\rho(1+a)) \left[1 - \frac{1}{(1-\rho(1-a))^2} \right].$$

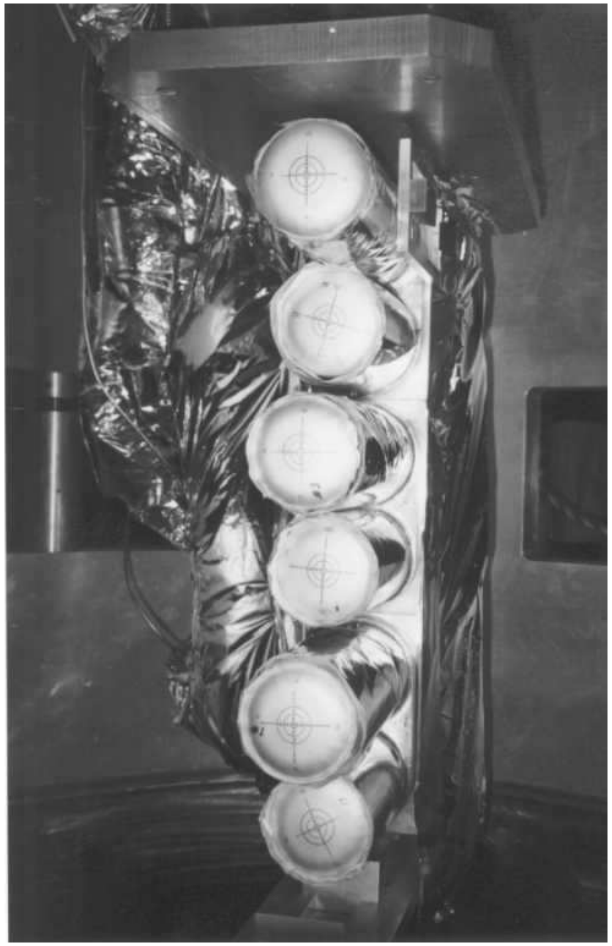
- non destructif
- haute intensité
- $A_c \;=\; 3.5\%$ $(4 GeV,$ Laser infra-rouge)
- moins rapide
- précision $\simeq \pm 3\%$



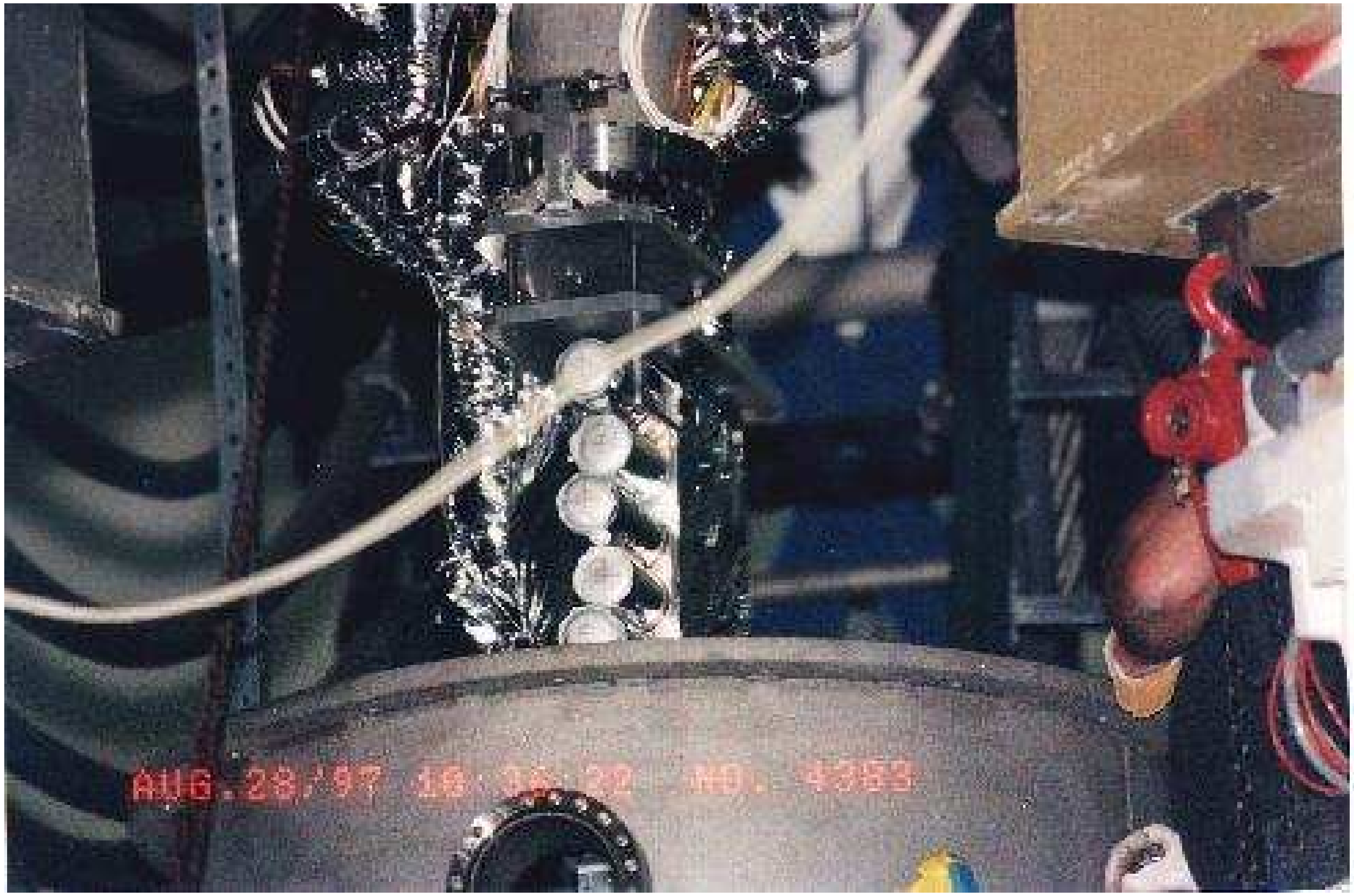
L'expérience HaPPEx

La cible de protons

- LH_2, $\rho = 0.0708 g/cm^3$.
- ébullition $20K$ à $1atm$.
- $\frac{dE}{dx} = 4.045 MeV/(g/cm^2)$.
- $\mathcal{P} = I_e(\mu A)\frac{dE}{dx}(MeV)\rho L(g/cm^2)$.
- $\mathcal{P} = 0.29 W/\mu A/cm$.
- $400W$ à $100\mu A$, $15cm$.
- Refroidissement N_2, He.
- "raster" : mm (kHz,$\sigma_e \leq 1mm$).



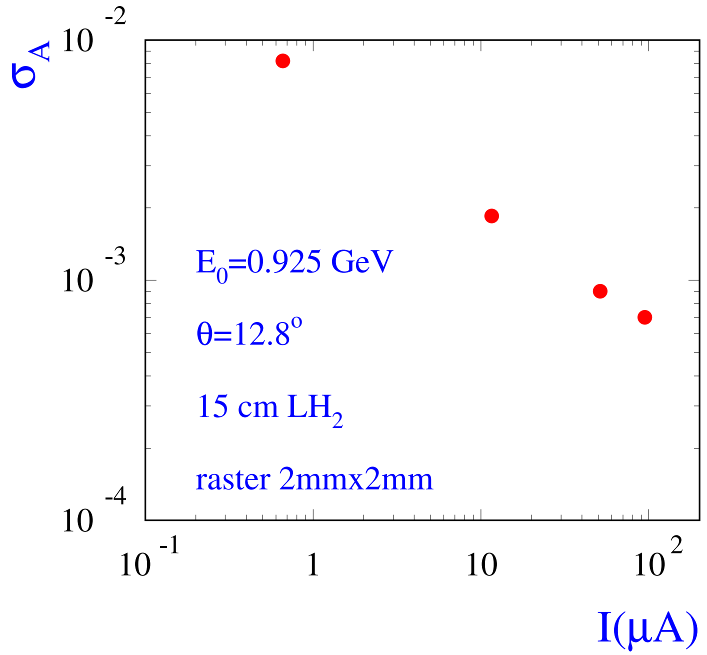
La cible de protons



L'expérience HaPPEx

La cible de protons

Mesure de l'ébullition



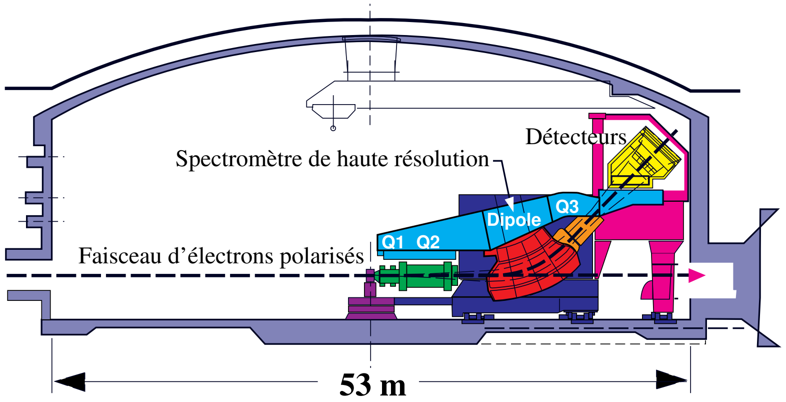
$$\sigma\left(A_{exp}\right) \propto \frac{1}{\sqrt{I_e}}\frac{1}{\sqrt{\rho}}.$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = -13\%$$

Erreur statistique $+7\%$

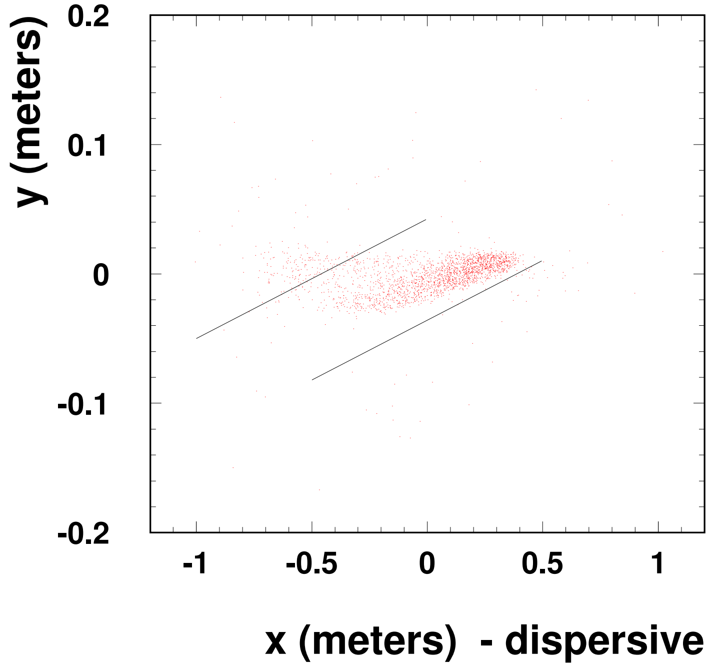
L'expérience HaPPEx

La Détection HAPPEX



- 2 spectros $QQDQ$, $0.5 - 3.GeV$.
- $\Delta p/p = 10^{-4}$.
- $\Delta\theta_V = \pm 60mrd$.
- $\Delta\theta_H = \pm 28mrd$.
- Impulsion ($\pm 4.5\%$).
- Séparation $12cm/\%$.
- Production de π à $20cm$ de l'élastique.
- $\Delta\Omega = 12msr$.

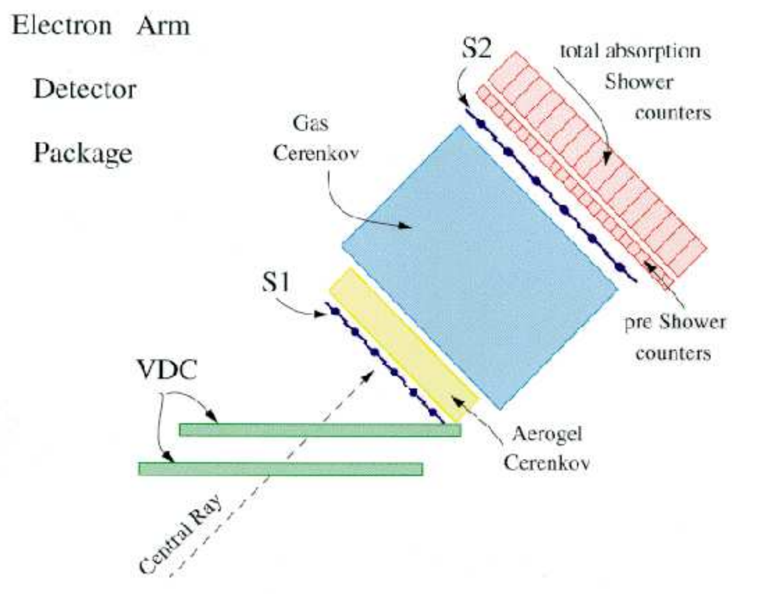
La Détection HAPPEX



- $10kHz$ (basse intensité)
- Trajectographie et identification des particules (Čerenkov à Gaz).
- $1MHz$ ($100\mu A$ intensité)
- Calorimètre (Čerenkov) sandwich Plomb Lucite.
- Flux intégrés

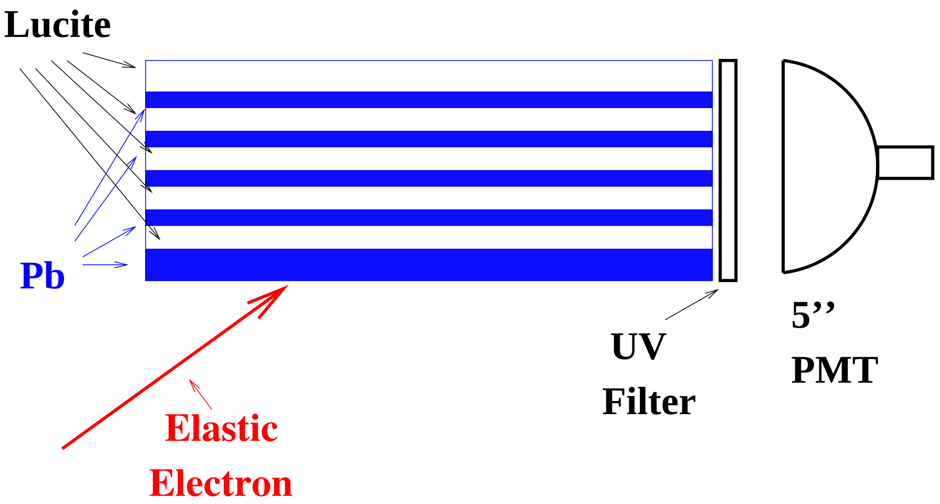
L'expérience HaPPEx

La Détection HAPPEX



- Vertical Wire Chamber (MIT)
- Trigger Scintillators S1/S2 (University of Regina)
- Aerogel Cerenkov Counter (University of Regina/INFN)
- Gas Cerenkov Counter (Saclay/INFN)
- Preshower Counter (Yerevan)
- Shower Counter (University of Maryland)
- Total Absorption Shower Counter (combination of preshower and shower)

La Détection HAPPEX



$$\left(\frac{\sigma(Q)}{Q}\right)^{Tot} = \frac{1}{\sqrt{N_P}}\sqrt{1+\left(\frac{\sigma(q_i)}{q_i}\right)^2}.$$

résolution 15% $\Rightarrow$ +1% Erreur Statistique

L'expérience HaPPEx

Les fausses asymétries

$$\frac{N_{ep}^{+}}{T^{+}} = \frac{I_e^{+}\,(\rho L)^{+}}{eA}\mathcal{N}_A\left(\left[\int_{\Delta\Omega+}\frac{d\sigma_0(E,\theta)}{d\Omega}d\Omega\right]^{+} + P_e^{+}\left[\int_{\Delta\Omega+}\frac{d\sigma_0(E,\theta)}{d\Omega}A_{PV}(E,\theta)d\Omega\right]^{+}\right).$$

$$\frac{N_{ep}^{-}}{T^{-}} = \frac{I_e^{-}\,(\rho L)^{-}}{eA}\mathcal{N}_A\left(\left[\int_{\Delta\Omega-}\frac{d\sigma_0(E,\theta)}{d\Omega}d\Omega\right]^{-} - P_e^{-}\left[\int_{\Delta\Omega-}\frac{d\sigma_0(E,\theta)}{d\Omega}A_{PV}(E,\theta)d\Omega\right]^{-}\right).$$

$$A_{exp}^{N} = \frac{\frac{N_{ep}^{+}}{I_e^{+}} - \frac{N_{ep}^{-}}{I_e^{-}}}{\frac{N_{ep}^{+}}{I_e^{+}} + \frac{N_{ep}^{-}}{I_e^{-}}} \simeq A_{exp} - A_I \simeq P_e A_{PV} + A_\rho + A_\sigma.$$

$$X^{\pm} = X_0\,(1 \pm A_X)\,,\quad X = I_e,\ \ (\rho L)\,,\ \ \left[\int_{\Delta\Omega}\frac{d\sigma_0}{d\Omega}d\Omega\right].$$

L'expérience HaPPEx

Fausses asymétries $\Rightarrow$ Monitorer

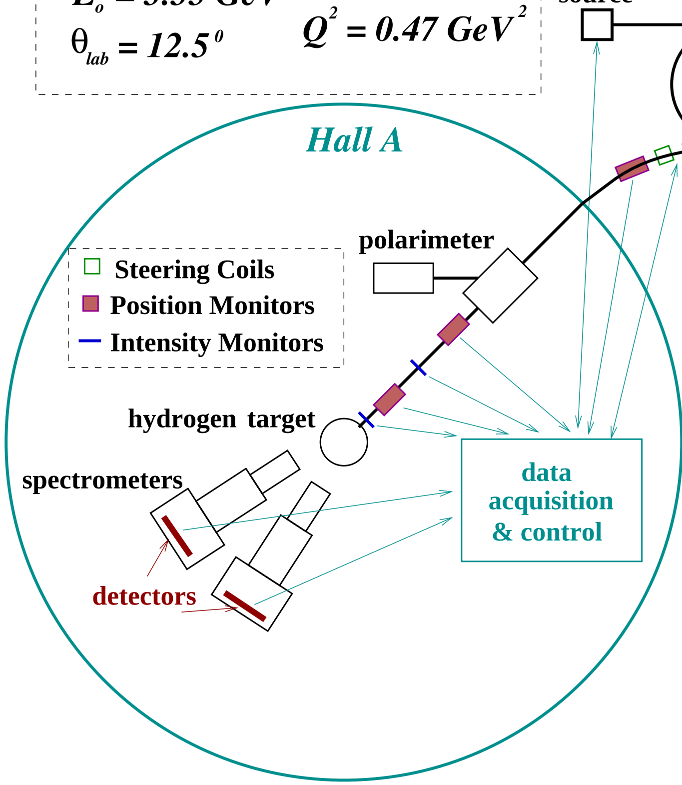
- Intensité (A_I et A_ρ)
- Énergie, $E^+ \neq E^- \Rightarrow \sigma(E^+) \neq \sigma(E^-)$, ($A_\sigma$)
- Position et incidence du faisceau, X, Y, θ_X, θ_Y, acceptance (A_σ).

Précision $\simeq \sigma(A_{exp})$

Moniteurs de faisceau

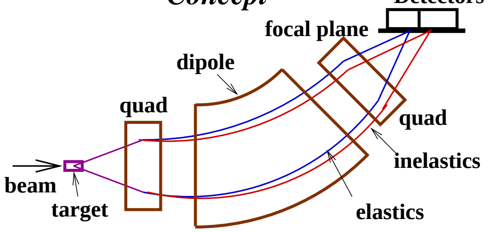
HAPPEX at Jefferson Lab: An Overview

E_o = 3.35 GeV
$\theta_{lab} = 12.5^o$
Q^2 = 0.47 GeV^2

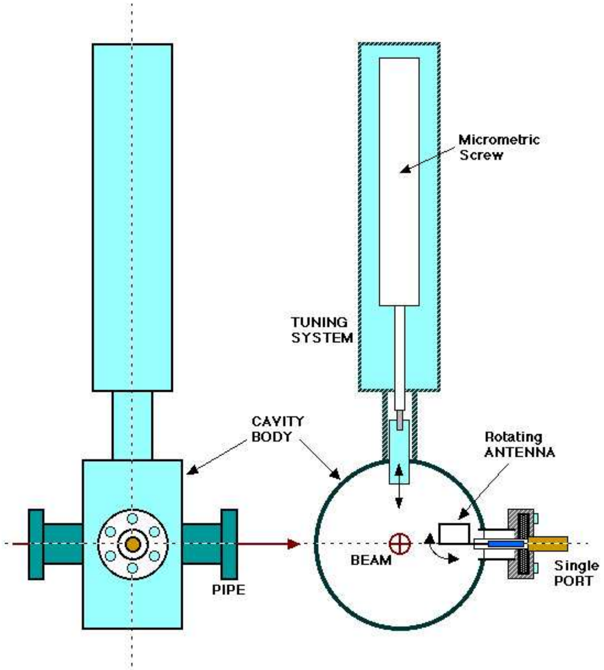


Hall
A
Proton
Parity
E
Xperiment

A_{raw} ~ 6 ppm
Rate: 2 MHz

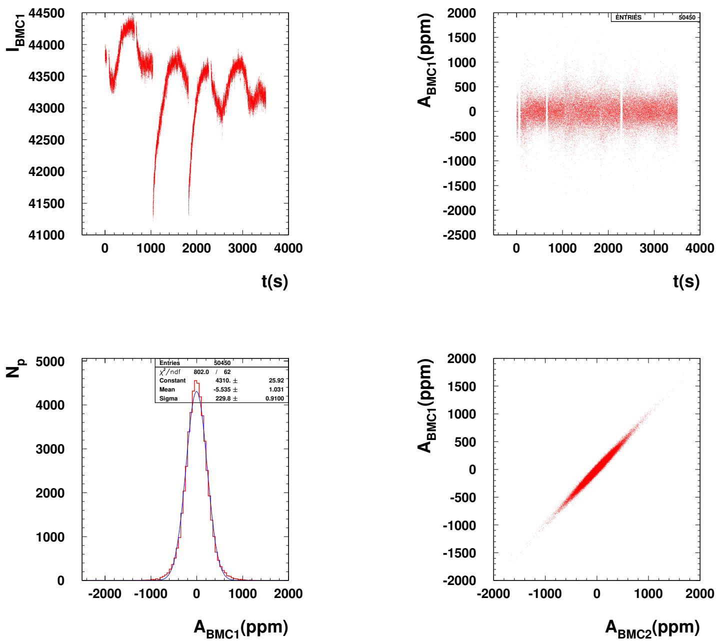


Les moniteurs d'intensité



- 2 cavités RF cylindriques
- $\Phi = 15.5cm$, $L = 15.2cm$,
- TEM_{010}
- $e^- \Rightarrow B \Rightarrow$ induction bobine.
- Peu sensible à la position ($0.06\%/cm$)
- Linéaires 0.5%.
- Signal intégré

Les moniteurs d'intensité



Bruit Intensité (30 Hz) : 300 ppm (1 ppm en 1 heure)
Bruit Instrument (30 Hz) : 2 ppm

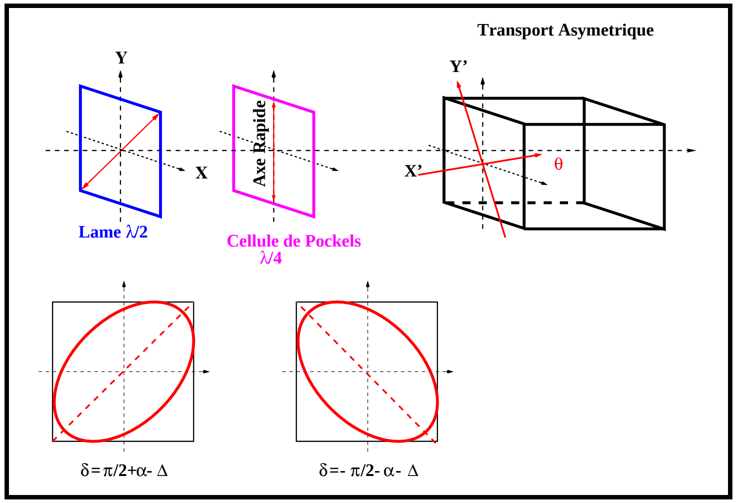
$$A_I \simeq -0.2ppm \pm 0.3ppm$$! (1 mois)

Asymétrie en courant A_I

$$\rho = f\,(I) \Rightarrow [A_I \Rightarrow A_\rho]$$

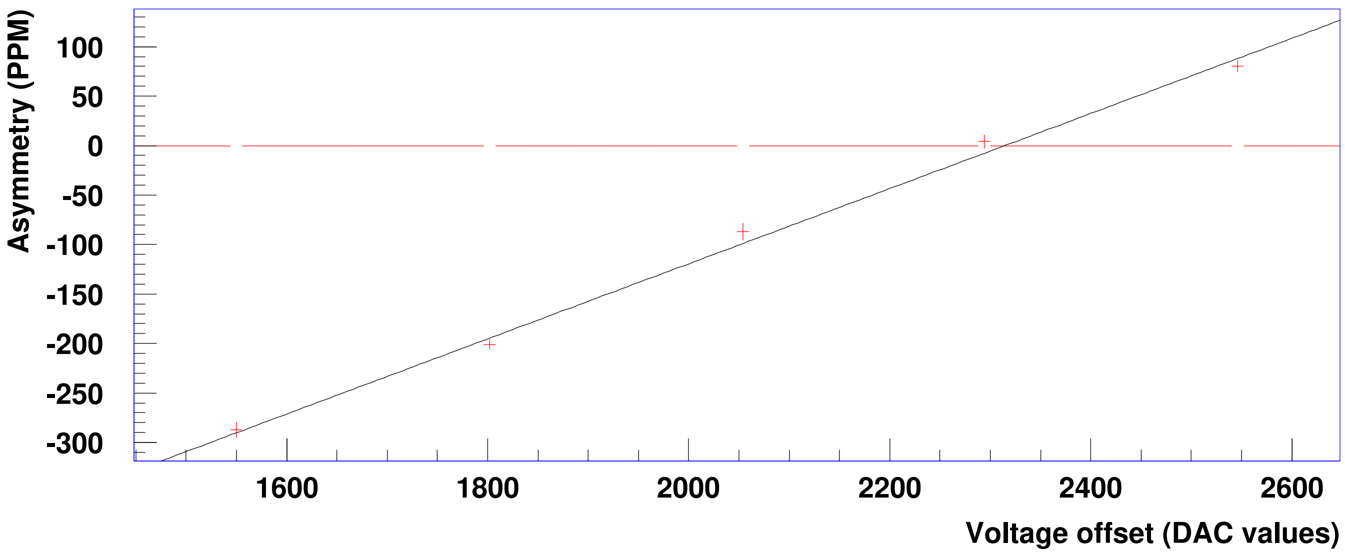
Source de A_I : PITA

1. α ellipticité de la PC
2. $\Delta = f(V_{PC})$ Asymétrie de la PC
3. ϵ asymétrie Transport



$$A_{PITA} = \frac{\Delta\epsilon}{T}\sin 2\theta = f(V_{PC}) \Rightarrow A_I = f(V_{PC})$$

Asymétrie en courant A_I

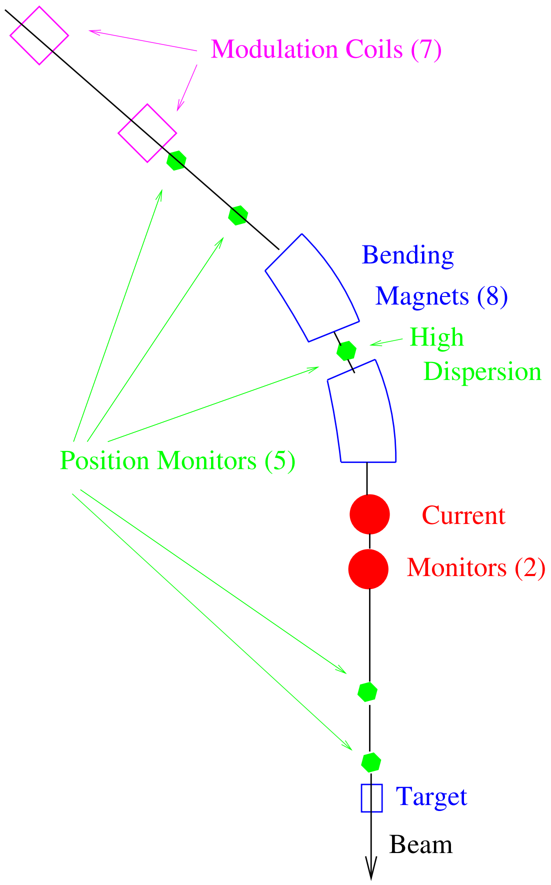


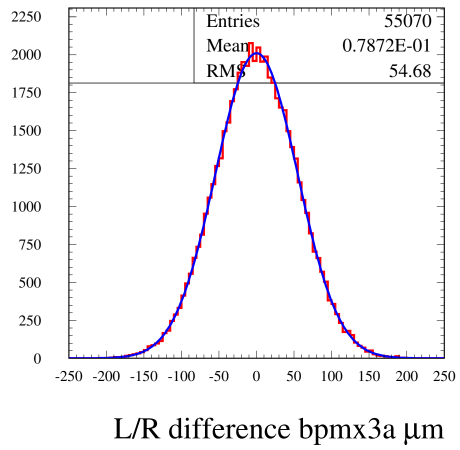
Asservissement (*Princeton*)

L'expérience HaPPEx

Les moniteurs de positions

BEAMLINE INSTRUMENTATION





$\Delta X \leq 15nm$ sur un mois !

Quel est l'effet sur A_σ ?

L'expérience HaPPEx

Modulation en position et énergie

$$A_\sigma = \sum_{i=1}^{10} a_i \left(X_i^R - X_i^L\right) .$$

- modulation position ($< 1mm$), (4 aimants de guidage)
- modulation énergie ($\simeq 100KeV$), (1 cavité)

$$a_i = \frac{1}{2Q}\frac{\partial Q}{\partial X_i}$$

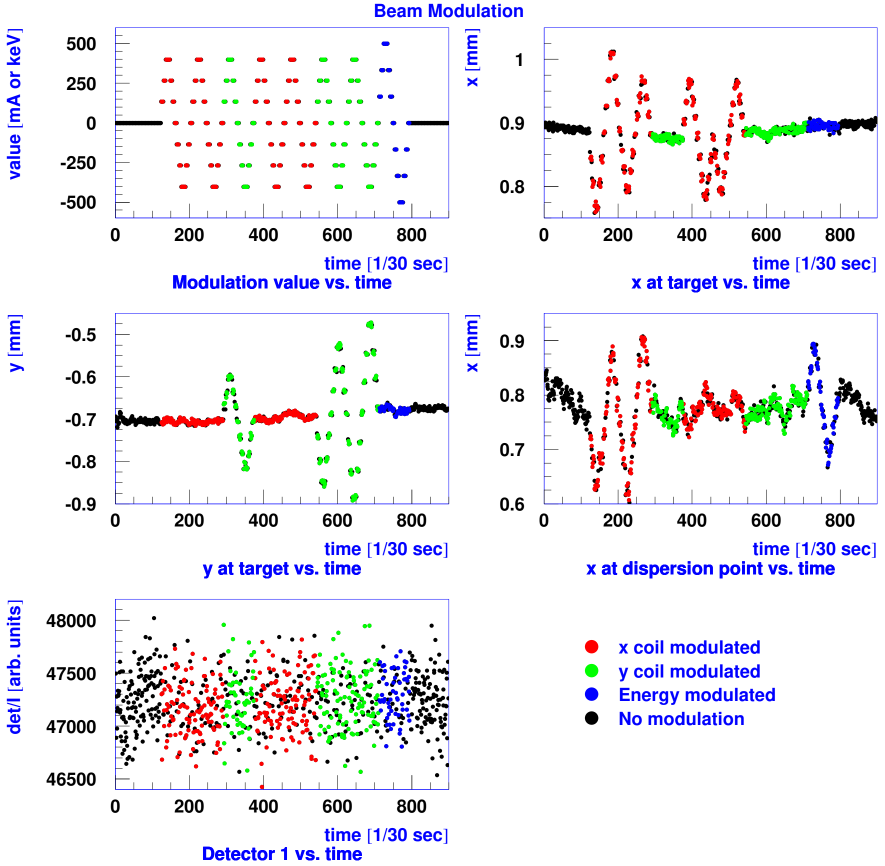
$$\frac{\partial Q}{\partial X_i} = \sum_{j=1}^{5} \frac{\partial Q}{\partial C_j}\frac{\partial C_j}{\partial X_i}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial C_j},\ et\ \frac{\partial X_i}{\partial C_j}$$

mesurés

L'expérience HaPPEx

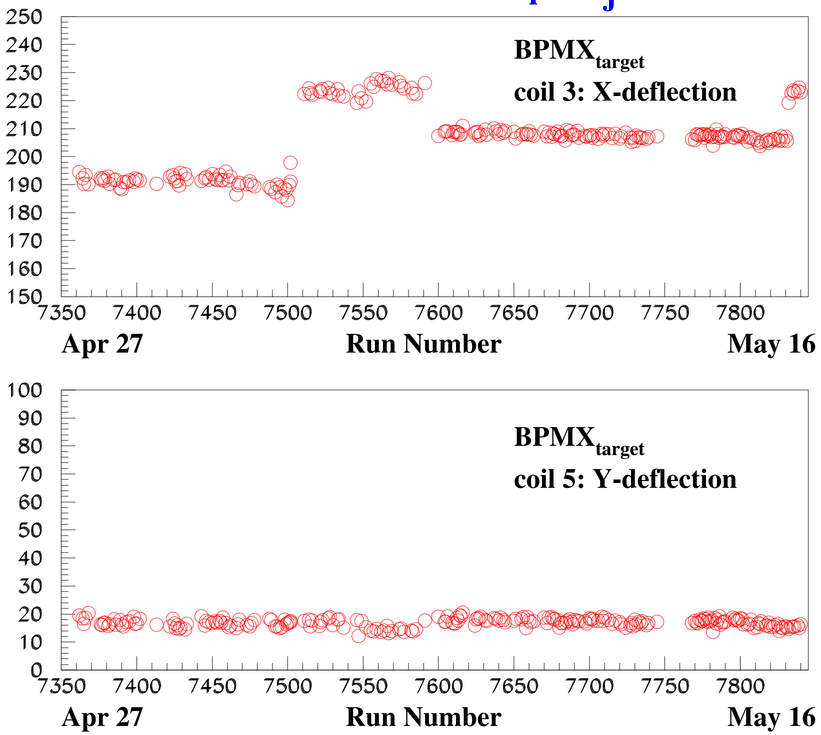
Modulation en position et énergie



L'expérience HaPPEx

Modulation en position et énergie

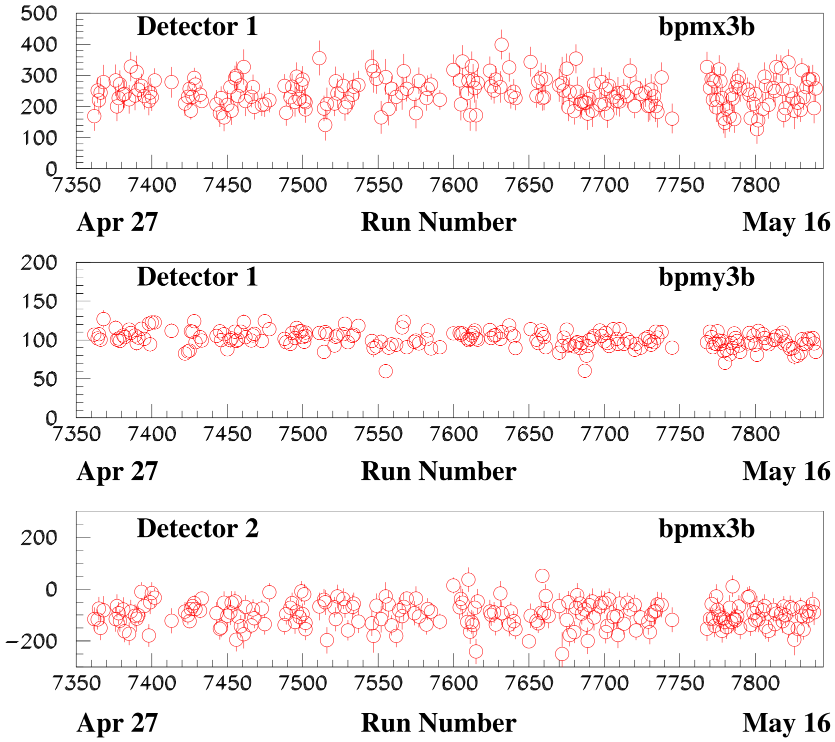
Stability of $\partial X_i/\partial C_j$



L'expérience HaPPEx

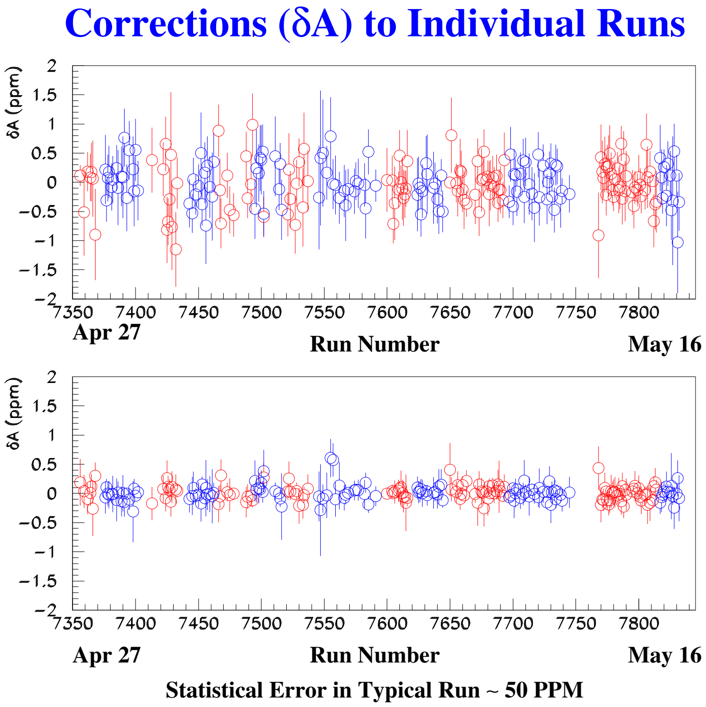
Modulation en position et énergie

Stability of ∂Q/∂C_i



L'expérience HaPPEx

Modulation en position et énergie



$$A_\sigma = 0.0ppm \pm 0.04ppm$$

L'expérience HaPPEx

Piedestaux et non linéarités

$$X_m = X_m^{(0)} + \alpha_x X \left(1 + \frac{\beta_x}{\alpha_x} X\right)$$

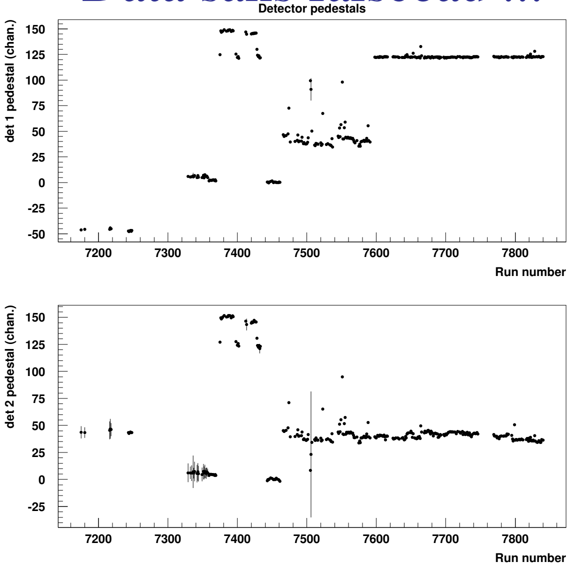
$$A_{X_m} = A_X \left[\frac{1 + \frac{\overline{X_m^{(0)}}}{\alpha_x \overline{X}} \frac{A_{X_m^{(0)}}}{A_X} + 2\frac{\beta_x}{\alpha_x}\overline{X}}{1 + \frac{\overline{X_m^{(0)}}}{\alpha_x \overline{X}} + \frac{\beta_x}{\alpha_x}\overline{X}\left(1 + A_X^2\right)} \right]$$

$$A_{X_m} \simeq A_X \left[\frac{1 + \frac{\overline{X_m^{(0)}}}{\overline{X_m}} \frac{A_{X_m^{(0)}}}{A_{X_m}} + 2\frac{\beta_x}{\alpha_x}\overline{X}}{1 + \frac{\overline{X_m^{(0)}}}{\overline{X_m}} + \frac{\beta_x}{\alpha_x}\overline{X}\left(1 + A_{X_m}^2\right)} \right]$$

La question se pose pour $X = Q_{det}, I, X, Y$

Piedestaux détecteurs

Data sans faisceau ...



$$\frac{Q^0_{det}}{Q_{det}} \leq 0.3\%$$

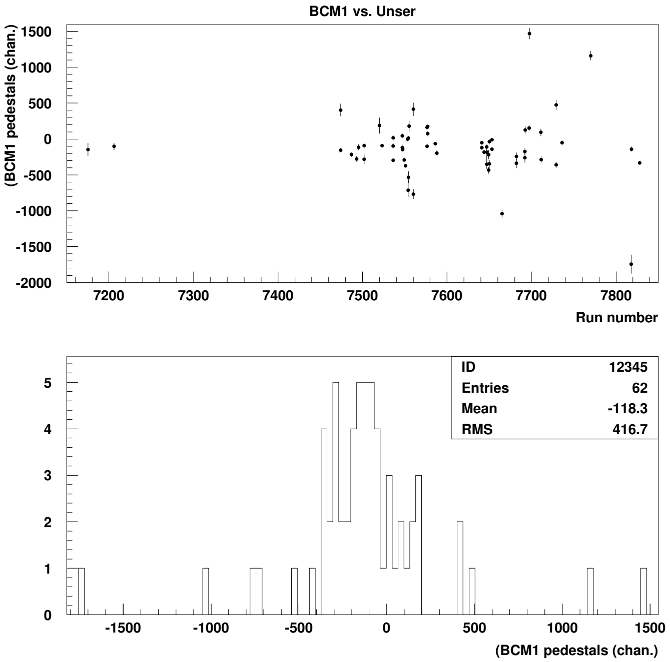
Crosstalk (acquisition d'un pile)

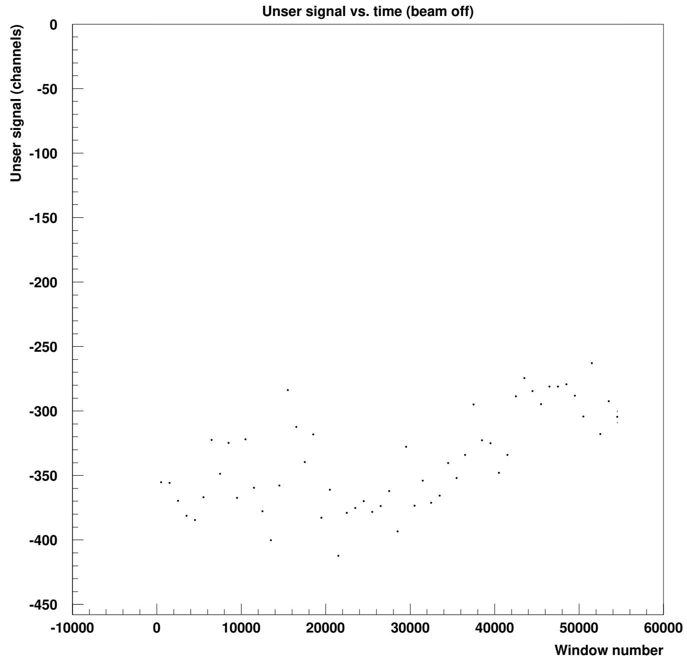
$$A_{X_0} \leq 0.015ppm$$

L'expérience HaPPEx

Piedestaux Moniteurs d’intensité

Corrélation Unser BCM





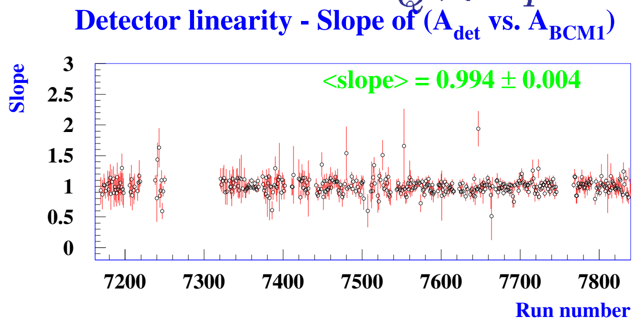
$$\frac{I_m^0}{I_m} \leq 1\%$$

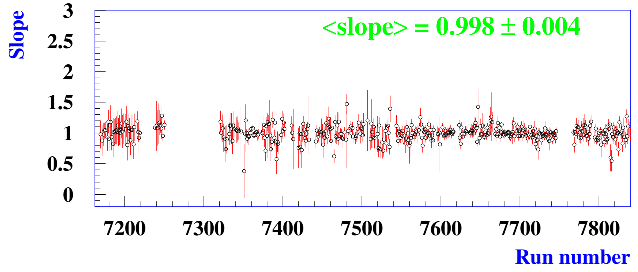
L’expérience HaPPEx

Non-linéarité des détecteurs

$$A_{Q_m} \simeq A_Q \left(1 + \frac{\alpha_Q}{\beta_Q}\overline{Q}\right) \simeq A_I \left(1 + \frac{\alpha_Q}{\beta_Q}\overline{Q}\right)$$

Corrélation $A_Q \% A_I$





$$\frac{\alpha_Q}{\beta_Q}\overline{Q} \leq 1\%$$

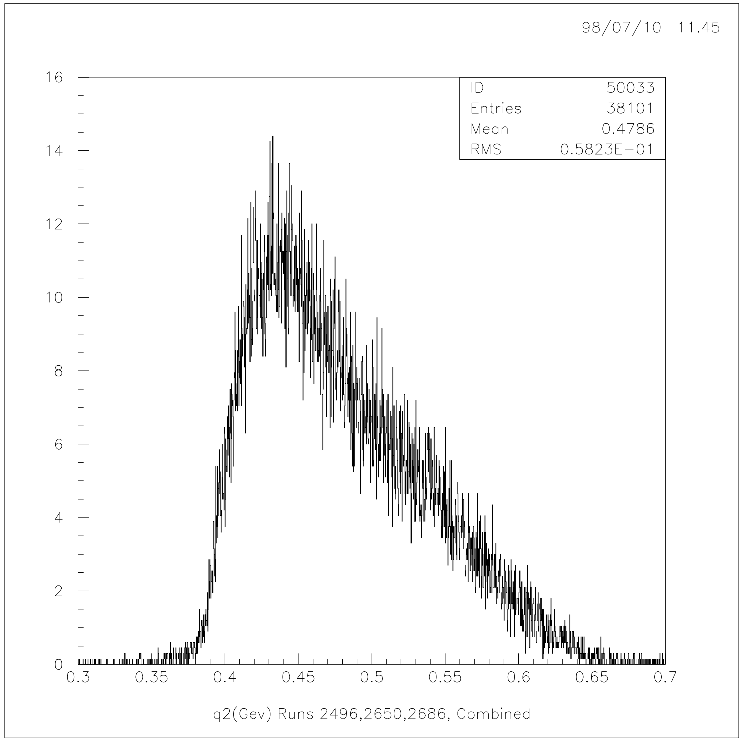
L'expérience HaPPEx

Détermination du Q^2

$$A_{PV} \propto Q^2$$

Tracking à bas I_e

Alignement, RC



$$Q^2 = 0.48 GeV^2$$

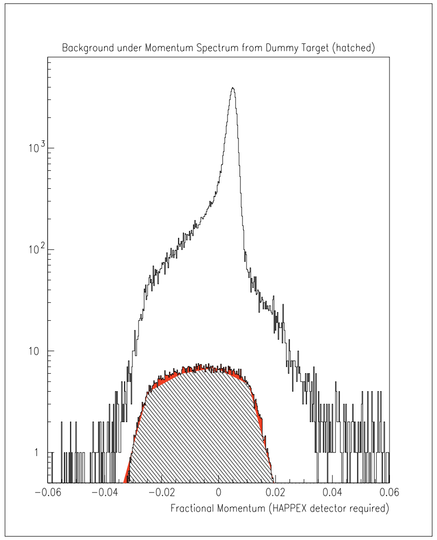
L'expérience HaPPEx

Les bruits

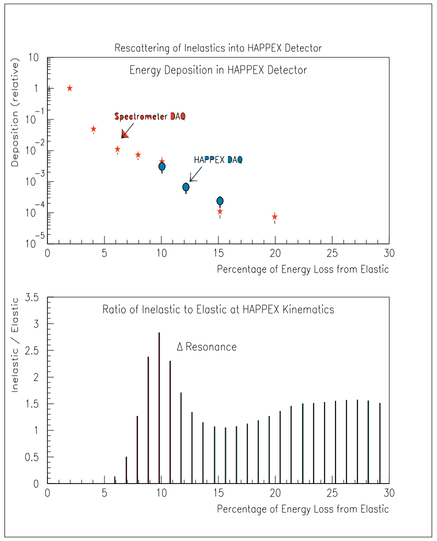
Pas de réjection du bruit

$$A_{mes} \simeq A_S \left(1 - \frac{B}{S} + \frac{B}{S}\frac{A_B}{A_S}\right)$$

Quasi-elastique sur parois cible



Rebonds inélastiques dans les spectros



Dilution 1.5 %

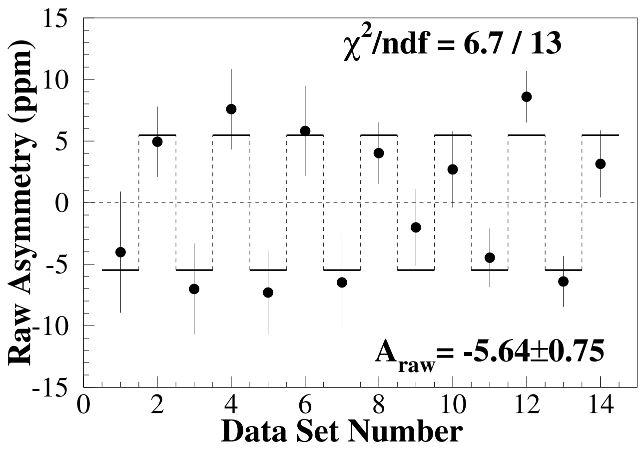
Fausse asymétrie de $0.54\% A_{PV}$

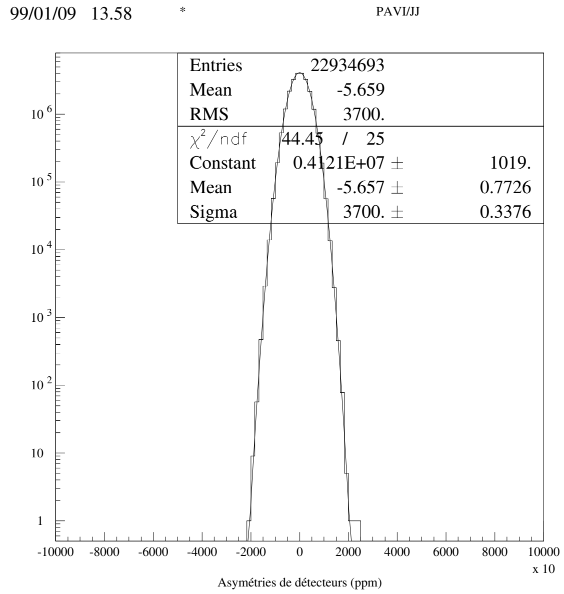
L'expérience HaPPEx

Asymétrie expérimentale

$$I_e \geq 3\mu A$$

78 Coulombs, 23 millions de paires



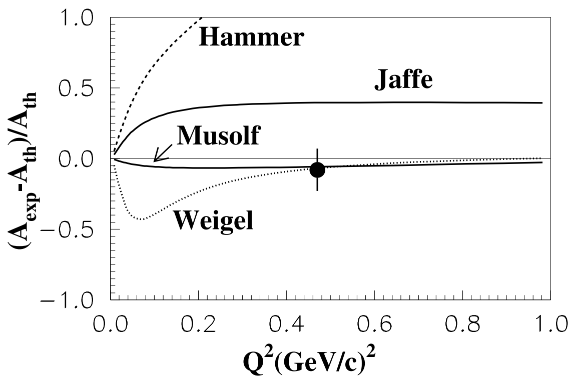


$$A_{exp} = -5.64 \pm 0.75\, ppm$$

L'expérience HaPPEx

Asymétrie de violation de parité

$A_{PV} = A_{exp}/P_e$, $P_e = 38.8\% \pm 2.7\%$ (7% relatif)



$$A_{PV} = -14.5 \pm 2 \pm 1.1\, ppm, \quad A^0_{PV} = -15.8\, ppm$$

$$\Delta A^{(s)} = 8.0 \pm 12.3 \pm 6.7\,\%$$

L'expérience HaPPEx

Facteurs de forme faibles neutres

à $Q^2 = 0.48\ \mathrm{GeV}^2$

$$\boxed{\left(G_E^Z + 0.39 G_M^Z\right) = 0.063 \pm 0.008(stat) \pm\ 0.005(syst)}$$

$$\left(G_E^Z + 0.39 G_M^Z\right)_{s=0} = 0.069$$

Facteurs de forme étranges

$$\boxed{G_E^s + 0.39 G_M^s = 0.023 \pm 0.034 \pm\ 0.022 \pm\ 0.026\ (\delta G_E^n)}$$

L'expérience HaPPEx

Budget des erreurs

A	Source of error	$\Delta A/A(\%)$
A_{raw}	Statistique	13.4
	Others	<0.3
A_{exp}	Polarisation	7
	Bruit	2
	Détermination Q^2	1
A_{th}	Facteurs de forme Nucleon (hors G_E^n)	4.0
	Corrections Radiatives	1.4
	G_E^n	9.6

L'expérience HaPPEx

Situation expérimentale

SAMPLE ($Q^2 = 0.1$ GeV^2)

$$G_M^s = +0.23 \pm 0.37(stat) \pm 0.15(syst) \pm 0.19(FF).$$

HAPPEX ($Q^2 = 0.48$ GeV^2)

$$G_E^s + 0.39 G_M^s = 0.023 \pm 0.034(stat) \pm\ 0.022(syst) \pm\ 0.026\ (\delta G_E^n)$$

Compatible "modèle standard"

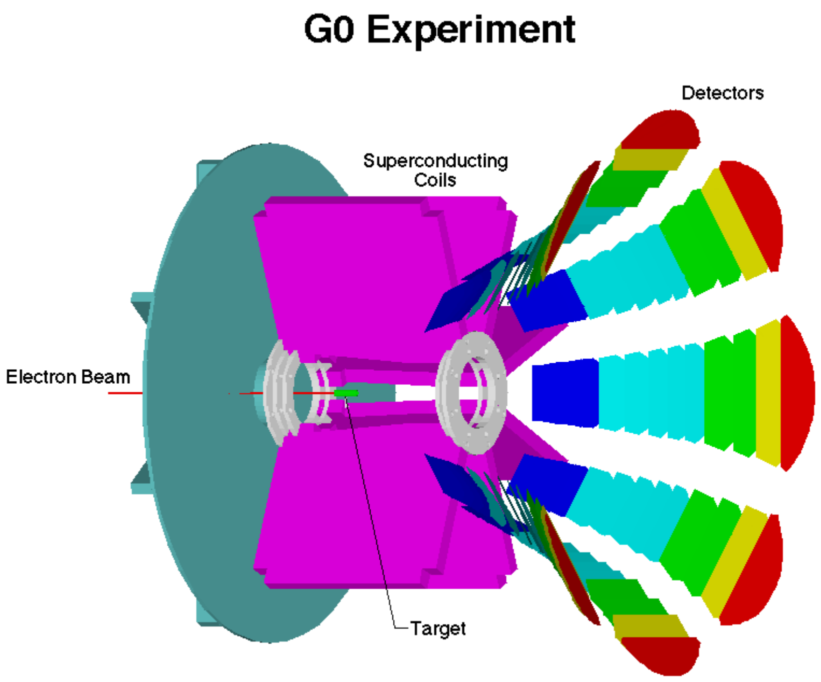
Effet quarks étranges faible (secteur vectoriel)

Des gluons ??? (secteur axial) $\Rightarrow$ COMPASS

Le futur

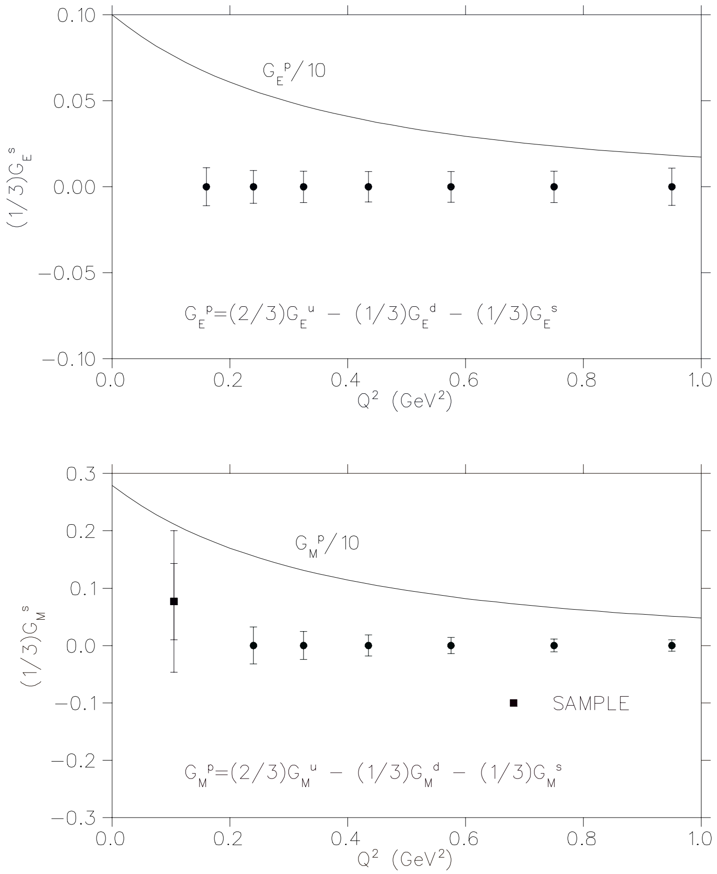
SAMPLE	Prise de données	1998	Erreur Stat. / 2
HAPPEX	Prise de données	1999	Erreur Stat. / 2
A4	Prise de données	1999(?)	

L'avenir : G0 (2000?)



L'expérience HaPPEx

L'avenir : G0 (2000?)



L'expérience HaPPEx

Décomposition SU(3) saveur des courants

$$\Psi = \begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix}$$

$$\hat{\mathcal{V}}_\mu^{(a)} = \bar{\Psi}\frac{\lambda^{(a)}}{2}\gamma_\mu \Psi, \quad \hat{\mathcal{A}}_\mu^{(a)} = \bar{\Psi}\frac{\lambda^{(a)}}{2}\gamma_\mu\gamma_5\Psi$$

$$\hat{\mathcal{V}}_\mu^{(s)} = \bar{s}\gamma_\mu s, \quad \hat{\mathcal{A}}_\mu^{(s)} = \bar{s}\gamma_\mu\gamma_5 s$$

$$\hat{\mathcal{V}}_\mu^{(I=0)} = \hat{\mathcal{V}}_\mu^{(8)} = \frac{1}{2\sqrt{3}}\left[\bar{u}\gamma_\mu u + \bar{d}\gamma_\mu d - 2\bar{s}\gamma_\mu s\right]$$

$$\hat{\mathcal{V}}_\mu^{(I=1)} = \hat{\mathcal{V}}_\mu^{(3)} = \frac{1}{2}\left[\bar{u}\gamma_\mu u - \bar{d}\gamma_\mu d\right]$$

$$\hat{\mathcal{A}}_\mu^{(I=0)} = \hat{\mathcal{A}}_\mu^{(8)}, \quad \hat{\mathcal{A}}_\mu^{(I=1)} = \hat{\mathcal{A}}_\mu^{(3)}$$

L'expérience HaPPEx

Décomposition SU(3) des courants

$$\hat{\mathcal{J}}^{V}_{FN,\mu} = \xi_V^{(I=0)}\ \hat{\mathcal{V}}_\mu^{(I=0)} + \xi_V^{(I=1)}\ \hat{\mathcal{V}}_\mu^{(I=1)} + \xi_V^{(0)}\ \hat{\mathcal{V}}_\mu^{(s)} ,$$

$$\xi_V^{(I=0)} = \xi_V^{(8)} + \frac{2}{\sqrt{3}}\xi_V^{(0)} = \sqrt{3}\left(c_v^u + c_v^d\right) ,$$

$$\xi_V^{(I=1)} = \xi_V^{(3)} = c_v^u - c_v^d, \quad \xi_V^{(0)} = c_v^u + c_v^d + c_v^s .$$

$$\hat{\mathcal{J}}^{A}_{FN,\mu} = \xi_A^{(I=0)}\ \hat{\mathcal{A}}_\mu^{(I=0)} + \xi_A^{(I=1)}\ \hat{\mathcal{A}}_\mu^{(I=1)} + \xi_A^{(0)}\ \hat{\mathcal{A}}_\mu^{(s)} ,$$

$$\xi_A^{(I=0)} = \xi_A^{(8)} + \frac{2}{\sqrt{3}}\xi_A^{(0)} = \sqrt{3}\left(c_a^u + c_a^d\right) ,$$

$$\xi_A^{(I=1)} = \xi_A^{(3)} = c_a^u - c_a^d, \quad \xi_A^{(0)} = c_a^u + c_a^d + c_a^s .$$

Décomposition SU(3) des courants

$$\hat{\mathcal{J}}^{(I=0)}_{EM,\mu} = \frac{1}{\sqrt{3}}\hat{\mathcal{V}}^{(8)}_{\mu} = \frac{1}{6}\left(\bar{u}\gamma_\mu u + \bar{d}\gamma_\mu d - 2\bar{s}\gamma_\mu s\right),$$

$$\hat{\mathcal{J}}^{(I=1)}_{EM,\mu} = \hat{\mathcal{V}}^{(3)}_{\mu} = \frac{1}{2}\left(\bar{u}\gamma_\mu u - \bar{d}\gamma_\mu d\right).$$

$$\hat{\mathcal{J}}_{EM,\mu}{}^{(p)} = +\frac{2}{3}\bar{u}\gamma_\mu u - \frac{1}{3}\bar{d}\gamma_\mu d - \frac{1}{3}\bar{s}\gamma_\mu s = \hat{\mathcal{J}}^{(I=0)}_{EM,\mu} + \hat{\mathcal{J}}^{(I=1)}_{EM,\mu},$$

$$\hat{\mathcal{J}}_{EM,\mu}{}^{(n)} = -\frac{1}{3}\bar{u}\gamma_\mu u - \frac{2}{3}\bar{d}\gamma_\mu d - \frac{1}{3}\bar{s}\gamma_\mu s = \hat{\mathcal{J}}^{(I=0)}_{EM,\mu} - \hat{\mathcal{J}}^{(I=1)}_{EM,\mu}.$$

$$\hat{\mathcal{J}}^{V}_{FN,\mu} = \sqrt{3}\xi_V^{(I=0)}\,\hat{\mathcal{J}}^{(I=0)}_{EM,\mu} + \xi_V^{(I=1)}\,\hat{\mathcal{J}}^{(I=1)}_{EM,\mu} + \xi_V^{(0)}\,\hat{\mathcal{V}}^{(s)}_{\mu}$$

Décomposition SU(3) des courants

Opérateur	Couplage	Valeur
$\bar{s}\gamma_\mu s$	$\xi_V^{(0)} = c_v^u + c_v^d + c_v^s$	$-\left(1 + R_V^{(0)}\right)$
$\hat{\mathcal{V}}_\mu^{(I=0)}$	$\xi_V^{(I=0)} = \sqrt{3}\left(c_v^u + c_v^d\right)$	$-\frac{4}{\sqrt{3}} \sin^2\theta_W \left(1 + R_V^{(I=0)}\right)$
$\hat{\mathcal{V}}_\mu^{(I=1)}$	$\xi_V^{(I=1)} = c_v^u - c_v^d$	$2\left(1 - 2\sin^2\theta_W\right)\left(1 + R_V^{(I=1)}\right)$
$\bar{s}\gamma_\mu\gamma_5 s$	$\xi_A^{(0)} = c_a^u + c_a^d + c_a^s$	$+\left(1 + R_A^{(0)}\right)$
$\hat{\mathcal{A}}_\mu^{(I=0)}$	$\xi_A^{(I=0)} = \sqrt{3}\left(c_a^u + c_a^d\right)$	$\sqrt{3} R_A^{(I=0)}$
$\hat{\mathcal{A}}_\mu^{(I=1)}$	$\xi_A^{(I=1)} = c_a^u + c_a^d + c_a^s$	$-2\left(1 + R_A^{(I=1)}\right)$

$$c_v^f = 2T_3^f - 4\mathcal{Q}_f \sin^2\theta_W$$

$$c_a^f = -2T_3^f$$

Décomposition SU(3) des courants

$$\xi_V^{(p)} = \frac{1}{2}\left[\sqrt{3}\xi_V^{(I=0)} + \xi_V^{(I=1)}\right] = \left(1 - 4\sin^2\theta_W\right)\left(1 + R_V^{(p)}\right)$$

$$\xi_V^{(n)} = \frac{1}{2}\left[\sqrt{3}\xi_V^{(I=0)} - \xi_V^{(I=1)}\right] = -\left(1 + R_V^{(n)}\right)$$

$$A_{PV} = -\frac{1}{4}\frac{G_F Q^2}{\pi\alpha\sqrt{2}}\left\{\xi_V^{(p)} + \frac{\epsilon G_E^{(p)}\left(\xi_V^{(n)}\, G_E^{(n)} + \xi_V^{(0)}\, G_E^{(s)}\right)}{\epsilon G_E^{(p)\,2} + \tau G_M^{(p)\,2}} + \frac{\tau G_M^{(p)}\left(\xi_V^{(n)}\, G_M^{(n)} + \xi_V^{(0)}\, G_M^{(s)}\right)}{\epsilon G_E^{(p)\,2} + \tau G_M^{(p)\,2}} - \frac{\delta G_M^{(p)} G_1^{(Z)}}{\epsilon G_E^{(p)\,2} + \tau G_M^{(p)\,2}}\right\}$$

L'expérience HaPPEx

Corrections d'ordre supérieur

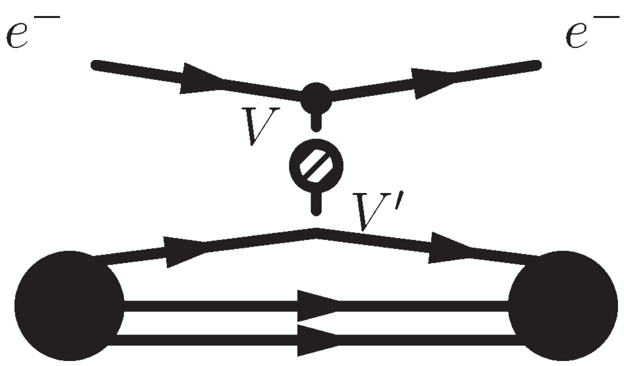
- Correction modèle standard
  J. Rosner, PR D42 (1990) 3107

  1. ”À un quark”
     W. Marciano, PRL 65 (1990) 2963.
  2. ”À plusieurs quarks” (”hadroniques”)
     W. Marciano, PR D29 (1984) 75,
     M. Musolf, PL B242 65 (1990) 461,
     B. Kaplan, NP B310 (1988) 527.

- Correction au delà du modèle standard
  W. Marciano, PRL 65 (1990) 2963

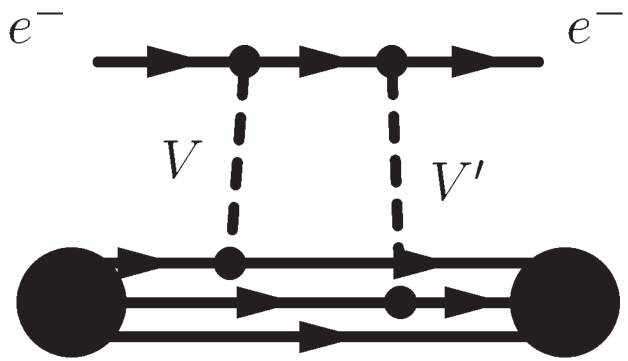
Corrections SM

À un quark



"Classique" + confinement (masse des quarks constituants dans les propagateurs, suppression des $p \leq 1/R_p$)

À plusieurs quarks



Quarks en interaction forte, QCD non pertubatif $\Rightarrow$ modèles hadroniques + quarks lourds (c, b, t).

	$\xi_A^{(I=0)}$	$\xi_A^{(I=1)}$	$\xi_A^{(0)}$
	$\sqrt{3} R_A^{(I=0)}$	$-2 \left(1 + R_A^{(I=1)}\right)$	$+1 \left(1 + R_A^{(0)}\right)$
"1 quark"	-0.43	-0.47	?
"had"	-0.19	-0.13	?
"lourds"	$+0.01$	0	$+0.00013$

	$\xi_V^{(I=0)}$	$\xi_V^{(I=1)}$	$\xi_V^{(0)}$
	$-\frac{4}{\sqrt{3}} \sin^2 \theta_W \left(1 + R_V^{(I=0)}\right)$	$2 \left(1 - 2 \sin^2 \theta_W\right) \left(1 + R_V^{(I=1)}\right)$	$-1 \left(1 + R_V^{(0)}\right)$
"1 quark"	-0.0113	-0.017	?
"had"	-0.0018	-0.0015	?
"lourds"	-0.0001	0	-0.0001

	$\xi_V^{(p)}$	$\xi_V^{(n)}$
	$\left(1 - 4 \sin^2 \theta_W\right) \left(1 + R_V^{(p)}\right)$	$-\left(1 + R_V^{(n)}\right)$
"1 quark"	-0.054	-0.0143
"had"	-0.013	-0.0006
"lourds"	$+0.00009$	$+0.00009$

L'expérience HaPPEx

Corrections au delà du SM

Schéma $\overline{MS}$, $m_t = 175 \pm 5$ GeV et $M_H = m_Z$

$$M_W^2 = \frac{\pi\alpha}{\sqrt{2} G_F \sin^2\theta_W \,(1 - \Delta r_W)}, \quad M_Z^2 = \frac{M_W^2}{\rho \cos^2\theta_W}.$$

PDG 1998

$$\Delta r_W = 0.0698 \pm 0.0001 \pm 0.0007 = \Delta r_W^0, \quad \rho = 1.0109 \pm 0.0006$$

$$\sin^2\theta_W = 0.23124 \pm 0.00017(+0.00024) = \sin^2\theta_W^0 = \bar{x}_0$$

$$\alpha(M_Z)^{-1} = 127.88$$

Physique nouvelle à $M(new) \gg M_Z$

"Self-energies" $\Pi_{ZZ,WW} = \Pi_{ZZ,WW} + \Pi_{ZZ,WW}^{new}$

$$\frac{1}{q^2 - M_{Z,W}^2 - \Pi_{ZZ,WW}(q^2)}$$

Corrections au delà du SM

Paramétrisation de Peskin-Takeuchi

$$\frac{\Pi_{WW}^{new}(0)}{M_W^2} - \frac{\Pi_{ZZ}^{new}(0)}{M_Z^2} = \alpha(M_Z)T,$$

$$Z_{ZZ}^{new} - 1 = \frac{\Pi_{ZZ}^{new}(M_Z^2)}{M_Z^2} - \frac{\Pi_{ZZ}^{new}(0)}{M_Z^2} = \frac{\alpha(M_Z)}{4\bar{x}\,(1-\bar{x})}S,$$

$$Z_{WW}^{new} - 1 = \frac{\Pi_{WW}^{new}(M_W^2)}{M_W^2} - \frac{\Pi_{WW}^{new}(0)}{M_W^2} = \frac{\alpha(M_Z)}{4\bar{x}}(S+U),$$

$$\Delta r_W \to \Delta r_W^0 + \Delta r_W^{new} = \Delta r_W^0 + \frac{\alpha(M_Z)}{4\bar{x}_0\,(1-\bar{x}_0)}S - \alpha(M_Z)T,$$

$$\sin^2\theta_W \to \sin^2\theta_W^0 + \frac{\alpha(M_Z)}{4\,(1-2\bar{x}_0)}S - \frac{\alpha(M_Z)\bar{x}_0\,(1-\bar{x}_0)}{(1-2\bar{x}_0)}T,$$

$$\mathcal{A} \to \mathcal{A}\,(1+\alpha(M_Z)T)$$

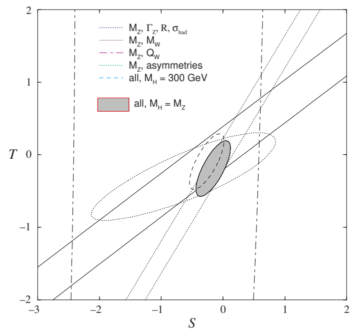
Corrections au delà du SM

$$R_V^{(I=0)}\ (new) = \frac{\alpha(M_Z)}{4\bar{x}_0\,(1-2\bar{x}_0)}S - \frac{\alpha(M_Z)\bar{x}_0}{(1-2\bar{x}_0)}T$$

$$R_V^{(I=1)}\ (new) = -\frac{\alpha(M_Z)}{2\,(1-2\bar{x}_0)^2}S + \frac{\alpha(M_Z)\left(1-2\bar{x}_0+2\bar{x}_0^2\right)}{(1-2\bar{x}_0)^2}T$$

$$R_V^{(p)}\ (new) = \frac{1}{1-2\sin^2\theta_W}\left(\left(1-4\sin^2\theta_W\right)R_V^{(I=1)} - 2\sin^2\theta_W\,R_V^{(I=0)}\right)$$

$$R_V^{(n)}\ (new) = \left(\left(1-4\sin^2\theta_W\right)R_V^{(I=1)} + 2\sin^2\theta_W\,R_V^{(I=0)}\right)$$



$$R_V^{(p)}\ (new) = +0.001 \pm 0.038,$$

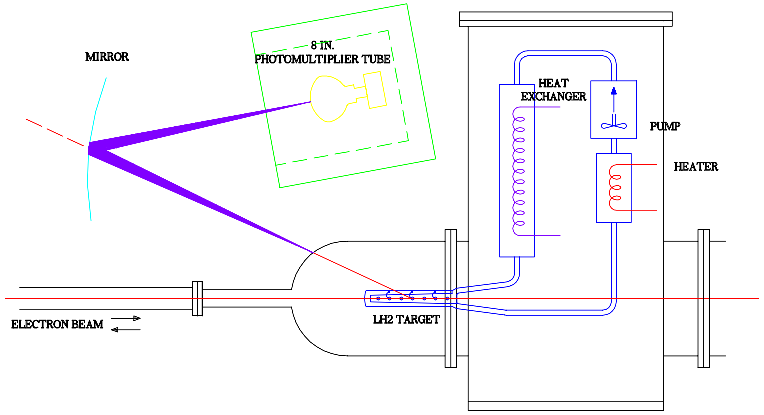
$$R_V^{(n)}\ (new) = -0.002 \pm 0.001.$$

L'expérience HaPPEx

Les expériences ...

Expérience	Machine	E GeV	θ $(^o)$	Q^2 GeV^2	$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ $(\mu b/srd)$	$\lvert A^0_{PV} \rvert$ (ppm)	I_e μA	P_e $\%$	$\Delta\Omega$ msr
HAPPEX	Jlab (USA)	3.355	12.5	0.5	0.68	16.5	80	40	12
SAMPLE	Bates (USA)	0.200	150	0.1	0.033	7	20	40	2140
A4	Mayence (All.)	0.855	35	0.235	0.38	6	?	?	700

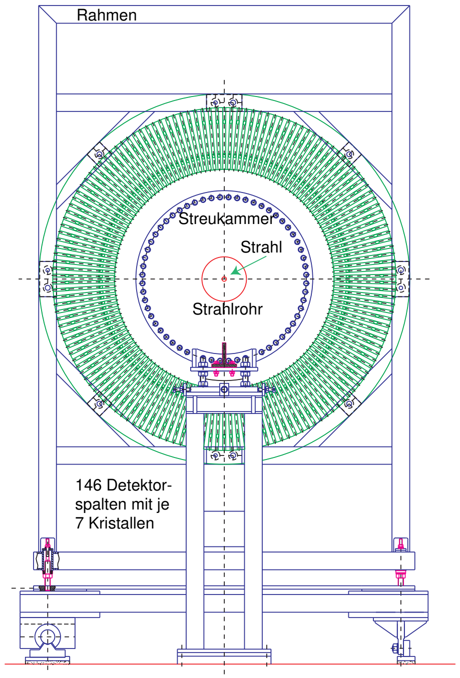
La Détection SAMPLE : mesure de $G_M^{(Z,p)}$



- $< \theta >= 150^o$, $E = 200 MeV$
- Détection à grand angle solide
- $130^o < \theta < 170^o$
- $\Delta\Omega \simeq 2.14 srd$
- Détecteur Čerenkov
- 10 PM de 20cm de diamètre.
- Flux intégrés
- Production de pion faible.

L'expérience HaPPEx

La Détection A4

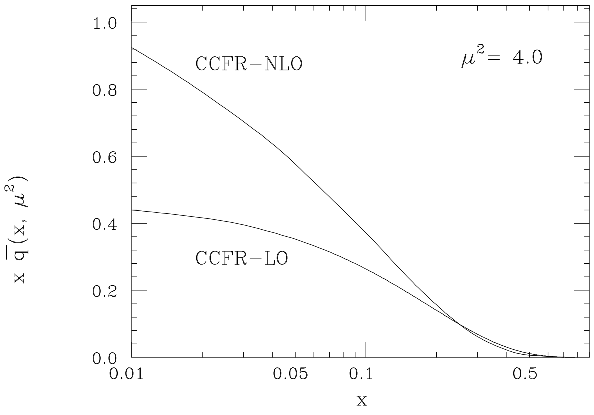


- Détection non magnétique, calorimètre PbF_2, 6 couronnes de 128 cristaux.
- $30^o < \theta < 40^o, \Delta\Omega \simeq 0.7srd.$
- Événement par événement. $10MHz$ signal et $100MHz$ de bruit.
- Rapidité et résolution en énergie.
- Électronique parallélisée.
- Cluster de 3×3 cristaux, $L = 13X_0,\ \ X_0 = 0.9cm,$ rayon $4/3r_M,\ \ r_M = 2.2cm \Rightarrow 3.5\%/\sqrt{E}.$

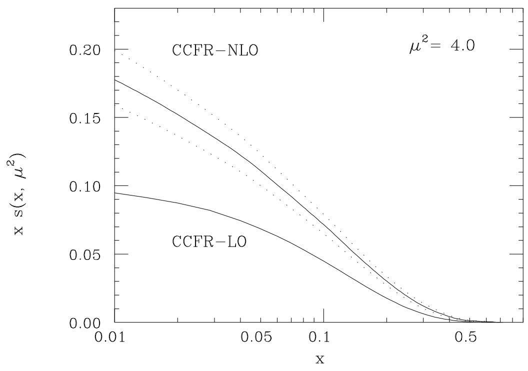
L'expérience HaPPEx

CCFR : $\nu_\mu N \to \mu^+ \mu^- X$

$$\sigma \propto \left(|V_{cd}|^2 \left[\xi u(\xi,\mu^2) + \xi d(\xi,\mu^2)\right] + |V_{cs}|^2 \xi s(\xi,\mu^2)\right)$$



CCFR 1: The quark sea distribution $x\overline{q}(x,\mu^2 = 4.0\ \mathrm{GeV}^2/c^2)$ determined at next-to-leading order and leading order.

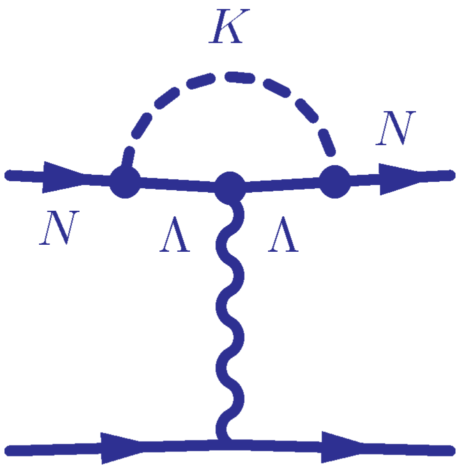


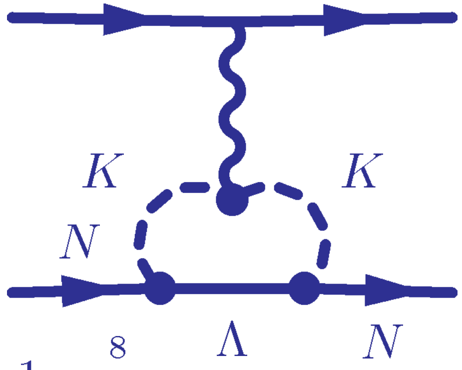
CCFR 2: The strange quark distribution

L'expérience HaPPEx

Modèle des boucles de Kaons

M. Musolf, et al., Z. Phys. C61 (1994) 433.





$$\mathcal{B} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{a=1}^{8} \Psi_a \lambda_a , \quad \mathcal{M} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{a=1}^{8} \Phi_a \lambda_a$$

$$i\mathcal{L}_{BBM} = DTr\left[\overline{\mathcal{B}}\gamma_5\left(\mathcal{M}\mathcal{B} + \mathcal{B}\mathcal{M}\right)\right] + FTr\left[\overline{\mathcal{B}}\gamma_5\left(\mathcal{M}\mathcal{B} - \mathcal{B}\mathcal{M}\right)\right]$$

$$F + D = \sqrt{2} g_{NN\pi}, \quad D/F = 1.5, \quad g_{N\Sigma K}/g_{N\Lambda K} = \sqrt{3}(F - D)/(3F + D) \simeq -1/5$$

Régulateur $g_{NNM} \rightarrow g_{NNM} \left[\frac{m_M^2 - \Lambda^2}{k^2 - \Lambda^2}\right]$

L'expérience HaPPEx